



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 210

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 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 10 від 13 грудня 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).

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

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT**

Випуск 210

«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 13.12.2024 р.

Формат паперу А4. Папір писальний.

Умовн. друк. арк. 16,5. 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.

Редакційна колегія

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

Випусковий редактор – Харін Руслан Олександрович, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
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)
Борзяк О. С., д.т.н., професор (Західнопомор.
технол. ун-т, Щецин, Польща)
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)
Русінська Т., д.т.н., професор, Західнопомор.
технол. ун-т (Щецин, Польща)
Веньжон Жу, доцент, Університет Західної
Шотландії)
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)
Редько І. О., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
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

Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Стефанов В. О., Держинський І. В.* Керування стійкістю баштового крана за допомогою використання штучного інтелекту 7
- Казанко О. В., Пенкіна О. Є.* Розв'язання хвильового рівняння в задачі про розповсюдження механічних хвиль у двовимірному шаруватому середовищі з майже інваріантним відношенням матеріально-геометричних параметрів 18
- Раківненко В. П., Колісник А. В.* Методика визначення рівня працездатності робочої деталі з ознаками механічних пошкоджень 27

Теплоенергетика (144)

- Біловол Г. В., Каграманян А. О., Василенко О. В., Онищенко А. В.* Розроблення моделі повної множини способів підвищення енергетичної ефективності виробничих систем як інструменту досягнення бізнесом цілей сталого розвитку 33

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Зінченко О. С.* Оцінювання якості крупного заповнювача, отриманого з подрібнених бетонних залізничних шпал 43
- Тарадай О. М., Гвоздецький О. В., Дяченко С. В., Гончаров К. А.* Порівняння фактичного та нормованого споживання гарячої води житловим фондом України 51
- Довженко О. О., Мищенко М. О., Шершерія Г. Р.* Розрахунок несучої здатності шпонкового з'єднання з руйнуванням шва за стиснутою смугою 60
- Лічнов І. С., Саницький М. А., Каганов В. О.* Вібропресовані дрібнозернисті наджорсткі бетони з застосуванням мінеральних сумішей нового покоління на основі перероблених золошлакових відвалів теплових електростанцій України 69
- Борзяк О. С., Журавель В. В.* Пенетрація хлорид-іонів із водних розчинів у цементні матеріали 78
- Наджафов Е. Ф., Чженьхуа С., Плугін Д. А., Плугін А. А.* Кінетика карбонізації захисного шару бетону залізобетонних опор контактної мережі залізниць 86
- Фесун І. К.* Дослідження світового досвіду із забезпечення нормативної бази для розрахунків стійкості будівель до прогресуючого обвалення 102
- Ткачов А. В., Ткачов О. А., Мироненко С. В.* Математична модель головних балок мостових кранів із попередньою напругою 111
- Бондаренко О. І., Стріжельчик Г. Г., Храпатова І. В., Василенко Є. П., Ляпін О. Є.* Особливості влаштування фундаментів на підтоплених і потенційно підтоплюваних територіях 121

Геодезія та землеустрій (193)

<i>Мамонов К. А., Гой В. В., В'яткін Р. С., Ковальчук В. С.</i> Оцінка використання земель із застосуванням методу експертних оцінок у системі територіального розвитку регіонів	126
<i>Канівець О. М., Скляр Ю. Л.</i> Аналіз методів оцінювання використання земель у територіальних громадах	135
<i>Шарий Г. І., Угненко Є. Б., Сорочук Н. І., Коростельов Є. М., Ужвієва О. М.</i> Актуальності земельного розвитку громад та оборонної стійкості України	143

Залізничний транспорт (273)

<i>Семко Ж. О.</i> Технічні регламенти у сфері залізничного транспорту. Застосування ризик-орієнтованих методів під час проектування	152
<i>Буц Ю. В., Каграманян А. О., Козодой Д. С., Крайнюк О. В., Гриценко Н. В.</i> Безпека функціонування транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану	163
<i>Ананьєва О. М., Червенко О. В.</i> Аналіз методів енергозбереження та енергоефективності та їх впровадження на залізницях України	172
<i>Ананьєва О. М., Довгаль С. О., Терехов Є. С.</i> Ефективність використання теплових насосів на залізничному транспорті	183

Транспортні технології (275)

<i>Копитков Д. М., Самчук Г. О., Черепаха О. С.</i> Оцінювання надійності транспортно-соціологічних досліджень у вигляді анкетних опитувань за допомогою пакетів статистичної обробки даних	191
<i>Мельник О. М., Онищенко О. А., Курдюк С. В., Гаврилюк Т. К., Бурлаченко Д. А.</i> Аналіз ефективності та перспективи використання морських безпілотних апаратів у логістичних системах	206
<i>Ломотько Д. В., Ільчишин В. М., Ломотько М. Д., Кудряшов Д. В.</i> Формування термінальної системи розподілу товарів у разі їх перевезення залізницею	217

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 621.873.3

**КЕРУВАННЯ СТІЙКІСТЮ БАШТОВОГО КРАНА ЗА ДОПОМОГОЮ
ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

Канд. техн. наук В. О. Стефанов, асп. І. В. Держинський

**STABILITY MANAGEMENT OF A TOWER CRANE USING ARTIFICIAL
INTELLIGENCE**

PhD (Tech.) V. Stefanov, postgraduate student I. Dzerzhynskiy

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320673>

***Анотація.** У цій роботі подано систему забезпечення стійкості баштового крана за допомогою методів штучного інтелекту. Система містить датчики для збору даних про зовнішні навантаження та параметри крана, контролер із нейромережевою моделлю для прогнозування параметрів вітру та алгоритм керування механізмами крана. Система розроблена для забезпечення стійкості крана в робочому та неробочому станах.*

Результати дослідження показали, що запропонована система може ефективно забезпечувати стійкість баштового крана в робочому стані, прогнозувати небезпечні пориви вітру і вживати відповідних заходів для запобігання перекиданню. Використання цієї системи може значно знизити кількість аварій на баштових кранах.

***Ключові слова:** баштовий кран, стійкість, штучний інтелект, нейронна мережа, зовнішні навантаження, система безпеки, прогнозування, керування.*

***Abstract.** Tower cranes remain an irreplaceable tool in the construction industry. The market for tower cranes is expected to grow to over \$3 billion by 2025. Hundreds of thousands of tower cranes are in operation worldwide, with over 5,000 in Ukraine. Most of these cranes have reached the end of their service life.*

The limited size of construction sites forces the use of tower cranes with a small support base, which are prone to tipping over during assembly and operation. Accidents on tower cranes occur regularly, with an average of 2 per year in the United States. About half of all tower crane accidents are related to tipping over. The main causes of tower crane accidents are technical reasons (failure of technical devices and safety devices), organizational reasons (violation of technological and labor discipline), and external influences (wind load).

This paper presents a system for ensuring the stability of a tower crane using artificial intelligence methods. The system includes sensors for collecting data on wind parameters and crane parameters, a controller with a neural network model for predicting wind parameters, and an algorithm for controlling crane mechanisms. The system is designed to ensure the stability of the crane in working condition.

The results of the study showed that the proposed system can effectively ensure the stability of the tower crane in working condition. The system can predict dangerous wind gusts and take appropriate measures to prevent tipping over. The use of this system can significantly reduce the number of accidents on tower cranes.

Keywords: tower crane, stability, artificial intelligence, neural network, wind load, safety system, prediction, control.

Вступ. У найближчі десятиліття баштові крани залишатимуться незамінними помічниками в будівництві. За оцінками Global Market Insights, щорічні світові поставки в найближчі роки досягнуть 40 тисяч баштових кранів на рік. Сьогодні у світі експлуатують сотні тисяч баштових кранів, із них в Україні понад 5 тисяч, значну кількість із яких виготовлено на вітчизняних заводах, щоправда більшість відпрацювали встановлений термін експлуатації [1].

Баштові крани через свої конструктивні особливості можуть зазнавати негативного впливу перевантаження, нерівностей висоти рейкової колії крана (просідання окремих ділянок) і різких змін зовнішнього навантаження. Слід зазначити, що аварії за участю баштових кранів складають 40 % загальної кількості інцидентів зі стріловими вантажопідійомними кранами.

Аварії на баштових кранах як на вітчизняних підприємствах, так і у світі фіксують регулярно, вони відбуваються навіть за дотримання всіх правил експлуатації та вимог безпеки [2]. Високі показники аварійності за експлуатації баштових кранів стійко зберігаються протягом значного періоду спостережень, а останніми роками навіть намітилася тенденція на збільшення, через що баштові крани належать до категорії найбільш небезпечних з усіх типів вантажопідійомних кранів.

Близько половини всіх аварій баштових кранів пов'язано з їх перекиданням, часто цьому передують руйнування елементів несучих металоконструкцій (рис. 1). Втрата стійкості призводить зазвичай до руйнування самої машини без можливості її подальшого відновлення, а також можливих вторинних руйнувань і людських жертв.



Рис. 1. Аварія баштового крана

Основними причинами аварій баштових кранів є несправність технічних пристроїв і пристроїв безпеки – більше 50 % усіх аварій. Значною, більше 30 %, залишається кількість аварій, що сталися з

організаційних причин, переважно через порушення технологічної та трудової дисципліни, неправильної чи неузгодженої дії некваліфікованого навченого персоналу [3, 4]. Щорічно у світі понад 20 % аварій

баштових кранів трапляються внаслідок дії сукупності несприятливих зовнішніх впливів, що діють на баштові крани, серед яких переважальним є вітрове навантаження. Вітрове навантаження – це випадковий процес. Нерівномірні пориви вітру, що виникають із непередбачуваною частотою та силою, збільшують ризик перекидання баштових кранів. Цей ризик зростає через динамічний характер вітрового навантаження, яке діє як раптовий і непередбачуваний імпульс. При цьому більше половини (близько 60 %) випадків аварій пов'язані з людським фактором [5], також непрофесійні дії машиніста крана призводять до появи аварійної ситуації або погіршують дії за зовнішніх навантажень, що раптово виникли.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням у галузі міцності та впливу на стійкість зовнішнього навантаження присвячені роботи М. П. Александрова, А. А. Вайнсона, М. Н. Гохберга, О. В. Григорова, В. С. Лавейкіна, М. А. Лобова, Ф. К. Іванченка та ін. Аналіз наукових праць за останні роки показав, що зусилля дослідників зосереджені на вдосконаленні моделей зовнішнього нестационарного навантаження, пошуку найбільш навантажених елементів металоконструкції баштових кранів певної конструкції та ухваленні інженерних і конструктивних рішень щодо зниження напружень, що виникають у них, а також розробленні адаптивних систем керування зниження впливу зовнішніх навантажень. Наприклад, конструкція баштового крана із рухомими вантажними візками або противагами, які синхронно змінюють виліт відповідно до зміни вильоту стріли та ваги транспортованого вантажу [6], спрощує пристрій протиперекидання та підвищує безпеку експлуатації крана, забезпечуючи стійкість крана через збільшення плеча протиперекидального моменту з автоматичною зміною відстані від осі опори крана до противаги та відновлення центра

тяжіння в межах його опорного контуру. Конструкція є простою у виконанні, оскільки не потребує додаткових противаг, що збільшують масу крана. Поворотна платформа подовжена на величину максимального ходу противаги. Автоматизація процесу знижує ризик впливу людського фактора під час перевантаження, оскільки датчики крену автоматично подають сигнали на блок керування, який за допомогою вантажної лебідки або гідроциліндрів швидко переміщує противагу, зменшуючи ризик перекидання крана. Переміщення противаги припиняється після досягнення рівноваги, що фіксується датчиком крену, який вимикає блок керування. Зі зниженням навантаження або зменшенням вітрового впливу відбувається крен у протилежний бік, і датчик крену знову активує блок керування, що приводить противагу у зворотний рух до досягнення рівноваги крана.

Одним із варіантів визначення напрямку вітрового потоку є використання датчиків із закладеними функціями визначення швидкості та напрямку вітру. У будь-якому стані з перевищенням заданих параметрів роботи крана, що ведуть до втрати стійкості, система формує сигнал для апаратури керування стійкістю. Апаратура керування стійкістю являє собою гідродинамічну або електромагнітну муфту, встановлену в кінематичну схему механізму повороту крана, розрив між гальмом і редуктором повороту крана (рис. 2).

Інтегрована в механізм повороту башти гідродинамічна муфта [7], що змінюється, дає змогу реалізувати функцію автоматичного керування баштовим краном: у режимі нормальної роботи кранової установки гідродинамічна муфта працює з повною віддачею, забезпечуючи практично жорсткий кінематичний зв'язок. Кінетична енергія вітрового впливу спрямована на перекидання кранової установки, що трансформується в потенційну енергію повороту башти,

причому за умови неповного відтоку рідини частина енергії розсіюється в гідродинамічній муфті. Далі зі збільшенням швидкості вітрового потоку контролер посилає керівні сигнали на гідродинамічну муфту задля забезпечення повного відтоку

рідини. Жорсткий кінематичний зв'язок «гальмо – гідродинамічна муфта – редуктор» порушується, і, як наслідок, кінетична енергія вітру трансформується в потенційну енергію повороту башти, тим самим забезпечуючи стійкість.

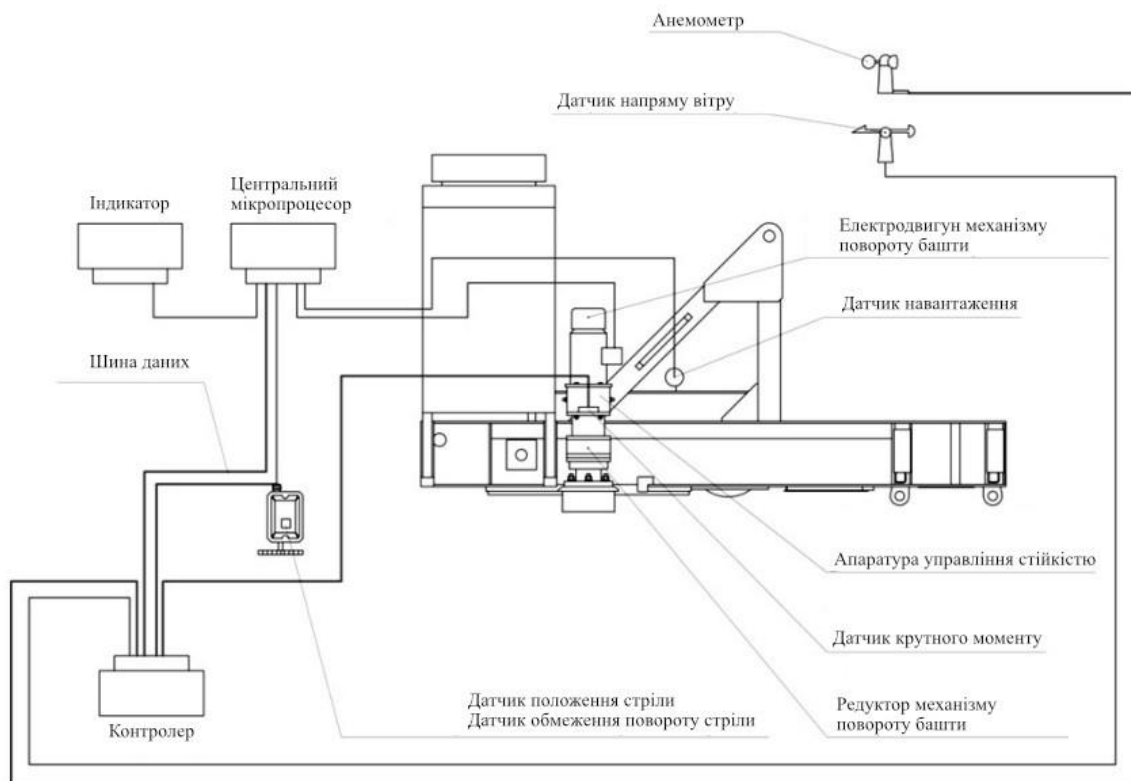


Рис. 2. Схема розташування апаратури керування стійкістю крана

Основною проблемою для задавання вихідних значень залишається розрахунок зовнішніх навантажень і вибір місця знімання фактичних даних. Нормативний спосіб розрахунку стійкості баштових кранів [8, 9] є доволі трудомісткою процедурою для проектувальника і не враховує можливості сучасних методів розрахункового аналізу несучих конструкцій, які дають змогу побудувати більш точні моделі кранів і провести уточнений аналіз їхньої стійкості за статичних навантажень. Нормативна модель стійкості баштового крана не враховує різні експлуатаційні стани баштового крана, а

також виникнення перехідних процесів на початку піднімання вантажу, повороту стріли та переміщення крана. Як вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів стійкості баштового крана пропонують використовувати реакції в місці контакту ходових коліс із крановою рейковою колією.

Отже, для розрахунку коефіцієнтів стійкості баштового крана і вихідних даних для постановки завдання системі керування пропонують використовувати реакції в чотирьох несучих стрижнях башти, у місці максимальних навантажень башти і стріли (рис. 3).

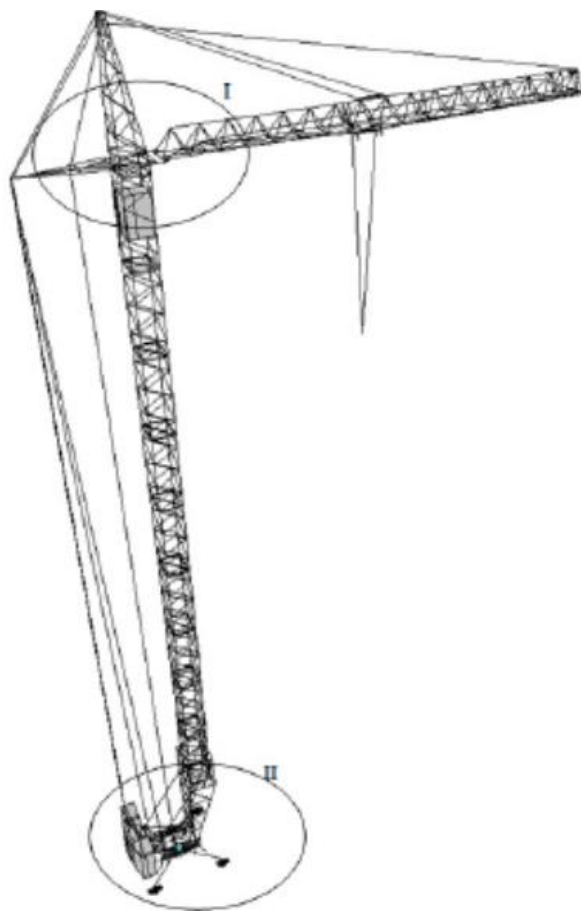


Рис. 3. Схема розташування максимальних навантажень башти і стріли

Визначення мети та завдання дослідження. Більшість авторів вказують на недосконалість методів проектування кранів, що не дають змогу врахувати податливість металоконструкції крана та наявність додаткових, у тому числі пікових, навантажень. Але головне в розрахунках – не можна врахувати неправильність дій персоналу, особливо у критичних ситуаціях, які найчастіше передують аварії. Тому вирішення питання виключення дії людського фактора для забезпечення стійкості баштових кранів за дії випадкових динамічних вітрових та інших зовнішніх навантажень є необхідним. А вдосконалення сучасних систем керування кранів для безпечної експлуатації на основі цифрових технологій є вкрай актуальним.

Основна частина дослідження. Нині ведуть дослідження з керування системами

баштового крана, яке включає адаптивне керування [10], формування команд [11, 12], нейронну мережу [13], керування плануванням посилення [14] і прогнозне керування моделлю [15]. З іншого боку, алгоритми нечіткої логіки також широко застосовували для контролю вібрації в різних системах [16-21]. Керування алгоритмами нечіткої логіки має сильну адаптивність і не потребує точної моделі керованого об'єкта завдяки своєму інтелектуальному методу [22]. Зазвичай сучасні методи керування для складної системи розроблені на основі лінеаризованої системної динаміки, для більшості потрібне точне знання моделі [10]. На відміну від цього, нечітко логічне керування має перевагу, яка заміняє роль математичної моделі нечіткою моделлю, заснованою на правилах, побудованих у форматі «якщо-

тоді». Запропоновано різні конструкції контролерів алгоритмів нечіткої логіки в системах баштових кранів [16-18, 22, 23].

Найбільш поширеними пристроями контролю стійкості від вітрових навантажень робочого стану є різновиди обмежувачів вантажопідйомності. Ці прилади працюють в індикаторному режимі, тобто в разі виникнення аварійної ситуації відбувається знеструмлення крана з підніманням вантажу вище від номінального, це є умовою збереження стійкості. Але за критичної швидкості вітру відбувається лише оповіщення машиніста (звукове, світлове) без впливу на керування вантажопідйомної машини.

Система вітрового захисту заснована на реєстрації швидкості вітру та утриманні пересувного крана протиугінними захватами.

Недолік систем вітрового захисту – приведення в дію захисних заходів після реєстрації небезпечних параметрів вітрових навантажень, відсутність в обмежувачів вантажопідйомності функції контролю стійкості до перекидання. Рішення – впровадження в алгоритми керування вантажопідйомними машинами функції екстраполяції на основі нейронечіткої логіки.

Система забезпечення стійкості має виконувати функції забезпечення контролю параметрів баштового крана та вітрових

навантажень і виробляти сигнали керування механізмами приводів.

Забезпечення стійкості баштових кранів за ненормованих зовнішніх впливів із використанням методів штучного інтелекту є актуальним.

Для завдань прогнозування параметрів вітрового навантаження використовують нечітку логіку, штучні нейронні мережі, нейронечітку логіку.

Принцип заснований на корегуванні положення поворотної частини баштового крана відносно напрямку вітру та видаванні попереджувальних сигналів на механізми для примусової зміни кутового положення поворотної частини.

Система безпеки заснована на нейромережевому та логічному алгоритмах. Нейромережевий алгоритм використовують для прогнозування значень напрямку та швидкості вітру, а логічний алгоритм – визначення небезпечної швидкості вітру (на основі прогнозованих значень) у пориві та керування приводами з метою завчасного переведення баштового крана в безпечне положення.

Система безпеки баштових кранів складається з підсистеми збору інформації про параметри вітру та баштового крана, підсистем нейромережевого прогнозування та керування приводами. Структурна схема подана на рис. 4.

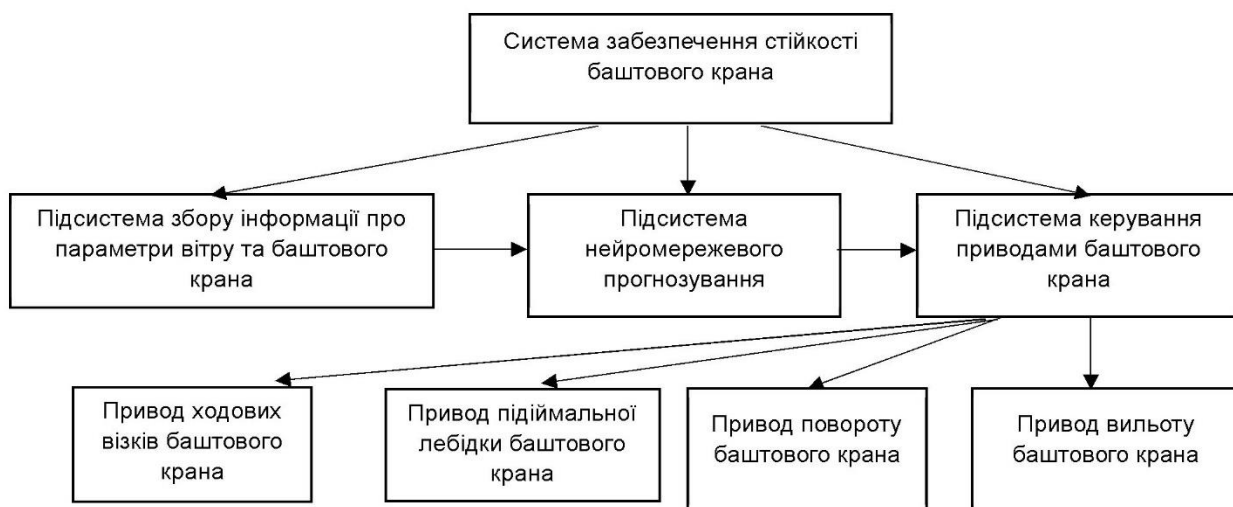


Рис. 4. Структурна схема системи безпеки баштового крана

Підсистема збору інформації про параметри вітру та баштового крана складається з датчиків, більшість із яких є в сучасному обмежувачі вантажопідйомності – датчики швидкості і напрямку вітру, положення стріли, висоти піднімання гака, вильоту гака. Додатково автором запропоновано оснастити кожен з чотирьох вертикальних стійок секції біля основи баштового крана тензодатчиками, а місця зчленування секцій з основою і оголовком крана промисловим триосьовим акселерометром-гіроскопом.

Підсистема нейромережевого прогнозування та керування приводами баштового крана заснована на промисловому контролері.

Умовою безпеки є видавання підсистемою нейромережевого прогнозування сигналу керування та його обробки підсистемою керування для спрацьовування приводів до виникнення критичного моменту перекидання від поривів вітру.

Нейромережева модель для прогнозування є нелінійною авторегресійною залежністю

$$x_{\text{пр}}(t) = x(t - \Delta), \dots, x(t - N\Delta), \quad (1)$$

де $x_{\text{пр}}(t)$ – прогнозоване значення;

$x(t - \Delta), \dots, x(t - N\Delta)$ – попередні значення, виміряні з кроком Δ (крок дискретизації реєстрованих значень).

Прогнозування реалізують на основі нейромережевої моделі з пам'яттю, якою є лінія затримки часу.

На рис. 5, а подана структурна схема прогнозування швидкості вітру, на рис. 5, б – структурна схема прогнозування напрямку вітру.

Для прогнозування швидкості та напрямку вітру використовуємо нейромережу прямого поширення з лінією затримки, схеми яких подані на рис. 6 і 7.

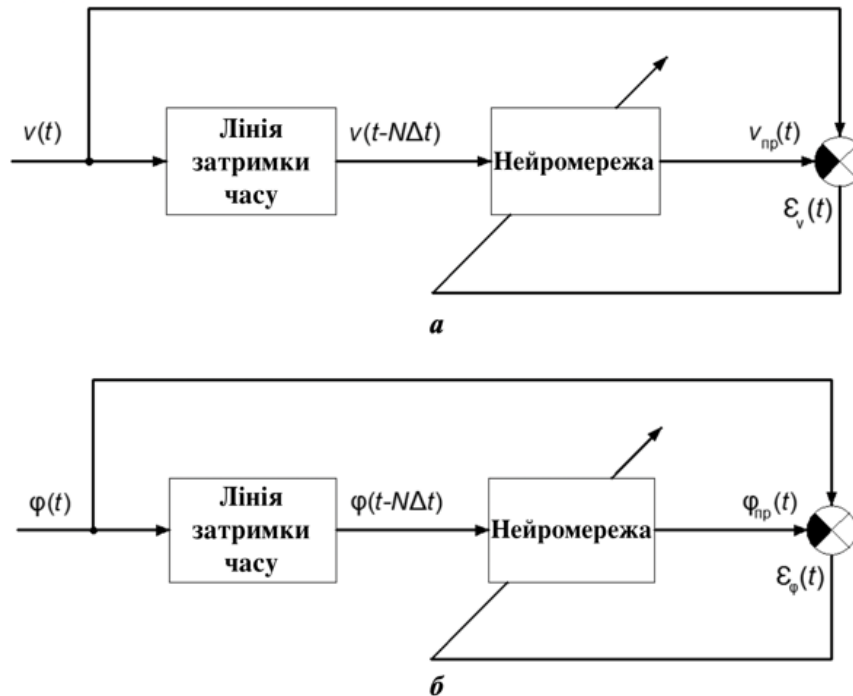


Рис. 5. Структурні схеми нейромережевої моделі прогнозування швидкості (а) і напрямку вітру (б)

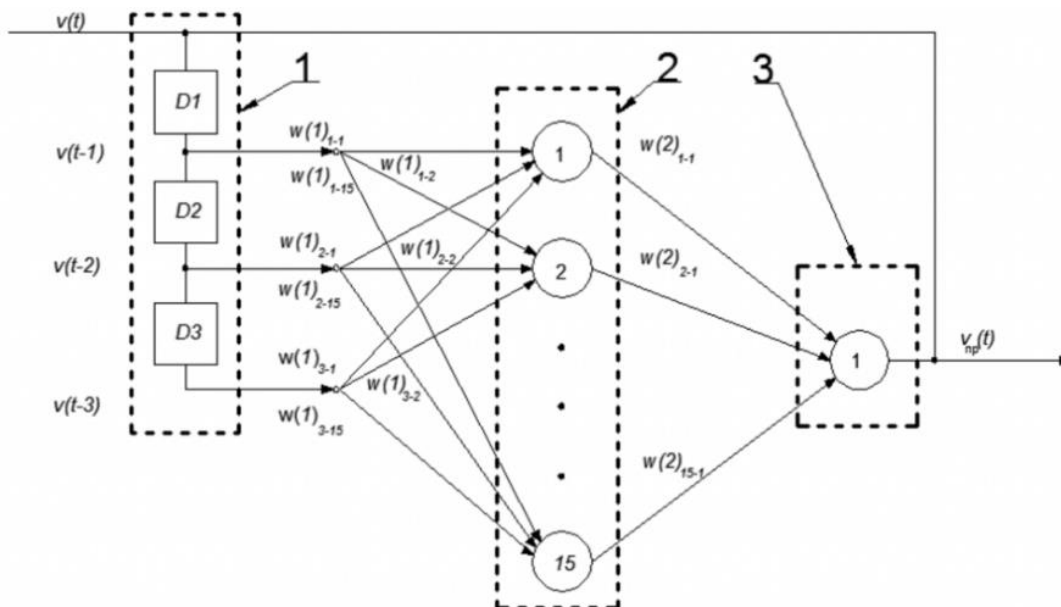


Рис. 6. Схема неймережевої моделі прогнозування швидкості вітру:
 1 – лінія затримки з відводами; 2 – проміжний шар; 3 – вихідний шар;
 $v(t)$ – поточне значення швидкості вітру; $v_{np}(t)$ – прогнозоване значення швидкості вітру;
 $v(t - 1) \dots v(t - 3)$ – попередні значення швидкості вітру;
 $w(1)_{1-1} \dots w(1)_{3-15}, w(2)_{1-1} \dots w(2)_{15-1}$ – вагові коефіцієнти;
 D1...D3 – елементи лінії затримки

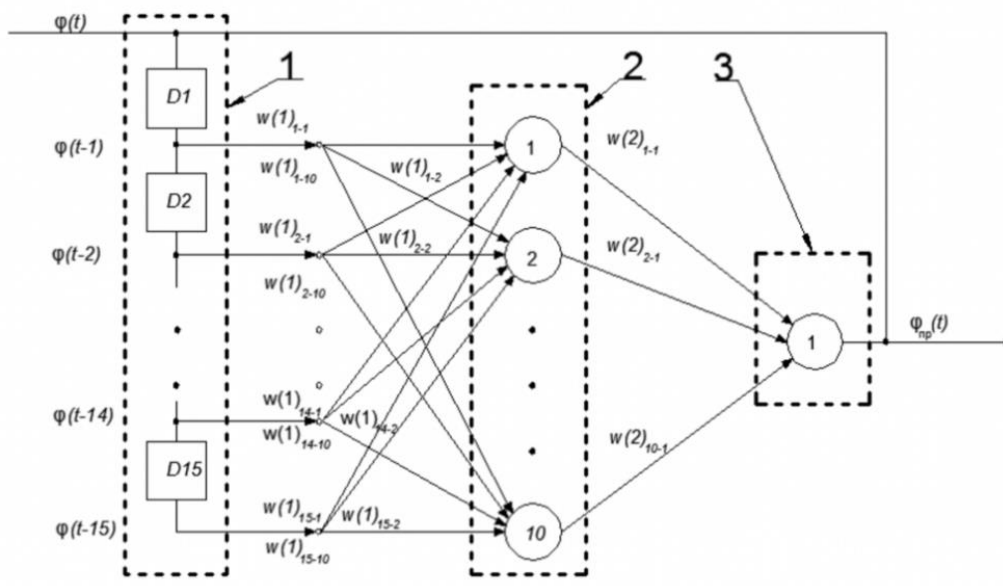


Рис. 7. Схема неймережевої моделі прогнозування напрямку вітру:
 1 – лінія затримки з відводами; 2 – проміжний шар; 3 – вихідний шар;
 $\varphi(t)$ – поточне значення напрямку вітру; $\varphi_{np}(t)$ – прогнозоване значення напрямку вітру;
 $\varphi(t - 1) \dots \varphi(t - 15)$ – попередні значення напрямку вітру;
 $w(1)_{1-1} \dots w(1)_{15-10}, w(2)_{1-1} \dots w(2)_{10-1}$ – вагові коефіцієнти;
 D1...D15 – елементи лінії затримки

У промисловий контролер закладено алгоритм завчасного керування приводами повороту, піднімання та/або зміни вильоту. Алгоритм призначений для видавання сигналу керування на основі нейромережевої моделі (програма нейромережевої моделі записана в пам'ять контролера) і значення датчиків швидкості і напрямку вітру. Прогнозуючи небезпечний порив і його напрямок, контролер формує сигнал керування, що надходить на привод повороту і/або привод зміни вильоту гака, для розвороту поворотної частини баштового крана в напрямку прогнозованого пориву вітру. Якщо розворот відбувається з вантажем, то небезпечних прискорень вантажу нема, оскільки розворот проводиться заздалегідь із номінальною кутовою швидкістю.

Система безпеки автоматично втручається в роботу машиніста лише для прогнозування небезпечної швидкості вітру, амплітуди коливання та зростання завантаженості однієї опори, що перевищує допустиме значення.

Система розроблена для забезпечення стабільності баштового крана в робочому стані. У неробочому стані баштовий кран стійкіший до вітрових навантажень за рахунок меншої вітрильності. У неробочому стані триває збирання інформації про параметри вітру. Можливе корегування положення баштового крана в неробочому стані за умови підключення його до мережі живлення після закінчення зміни.

Для запобігання відмови системи безпеки застосовують такі дії:

- навчання нейромережевим алгоритмам;
- планово-попереджувальні перевірки нейромережевих алгоритмів.

Для виконання першого пункту необхідно створити базу даних параметрів вітру місцевості, де буде експлуатований баштовий кран. База даних повинна мати значення параметрів вітру за тривалий період спостереження з різними кроками реєстрації. Далі відбувається навчання

нейромережевих алгоритмів у лабораторних умовах на початок експлуатації баштового крана. Потім контролер із навченими алгоритмами підключають до шафи керування баштового крана.

З проведенням перевірок нейромережевих алгоритмів під час експлуатації баштового крана можливе донавчання контролера. Це пов'язано з тим, що у процесі роботи баштового крана база даних параметрів вітру постійно поповнюється.

Безперервний контроль з екстраполяцією параметрів для майбутнього стану дасть змогу реалізувати запобіжний захист, який забезпечує раннє виявлення небезпечних поривів вітру.

Для перевірки теоретичних результатів досліджень доопрацьована фізична модель стрілової системи баштового крана на базі навчальної моделі КБ403А, яка дала змогу в лабораторних умовах провести експериментальні дослідження. Під час досліджень за допомогою лебідки під різними кутами до осі башти відбувалося навантаження. Датчики зусиль були встановлені на чотирьох несучих стрижнях башти, у місцях максимальних навантажень башти і стріли. Датчики рівня встановлювали в трьох точках, віддалених за висотою башти. Зміни навантаженості башти виводили на екран ПК, а розроблена програма давала команду механізму повороту на зміну кута для зниження навантаженості. Крім того, розроблено методику проведення експериментальних досліджень, підібрано вимірювально-реєструвальне обладнання (датчики та система збору даних). Керування рухами механізмів лабораторної установки на базі баштового крана КБ-403А у масштабі 1:20 (рис. 8) проводили за допомогою розробленої комп'ютерної програми. Отримані у ході експериментів дані оброблені за допомогою методів математичної статистики. На основі проведених досліджень обґрунтовано будову системи автоматичного керування

механізмами баштового крана та запропоновано правила її функціонування. Для підтвердження отриманих

експериментальних даних заплановано проведення експерименту на нинішній моделі баштового крана.



Рис. 8. Модель баштового крана КБ-403А (масштаб 1:20)

Висновки. Запропонована методика визначення стійкості баштового крана на основі визначення опорних реакцій на чотирьох несучих стрижнях башти за допомогою тензодатчиків і промислового триосьового акселерометра-гіроскопа та комп'ютерного моделювання. При цьому з'являється можливість розробити і застосувати систему автоматизованого моніторингу та систему автоматизованого контролю за стійкістю крана.

Подана система забезпечення стійкості виконує функції забезпечення контролю параметрів баштового крана та навантажень за ненормованих зовнішніх впливів із використанням методів штучного інтелекту.

Подальшу роботу зведено до порівняння результатів роботи систем керування, побудованих на методах нечіткої логіки, штучних нейронних мереж і нейронечіткої логіки.

Список використаних джерел

1. Кружилко О. Є., Майстренко В. В., Атаманюк О. О. Перспективи використання інформаційної системи обліку баштових кранів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2015. № 29. С. 64-69. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/pop_2015_29_10, 2015. (дата звернення: 02.05.2024).
2. Rosenfeld J. Safety Data About Tower Crane Accidents. URL: <https://www-rosenfeldinjurylawyers-com.translate.google.com/news/what-osa-safety-data-tells-us-about-tower-crane-accidents> (last access 03.05.2024).

3. Fedina E. V., Pushenko S. L. Analysis of the main causes of injuries when operating tower cranes. *Inzhenernyi vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]*. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/> (дата звернення: 02.05.2024).
4. Polina N., Povetkina Elena A. Khamidullina Analysis of emergency and industrial injuries when dealing with loading mechanisms. XXI century. *Technosphere safety*. 2018. Vol. 3(4). P. 40—50. DOI: 10.21285/1814-35202018-4-40-50.
5. Короткий А. А., Павленко А. Н., Кинжибалов А. А., Кинжибалов А. В. Системы безопасности башенных кранов в аспекте решения проблемы аварийности и производственного травматизма. *Вопросы безопасности*. 2018. № 5. С. 25-34.
6. Design, construction, and control of a novel tower crane / J. J. Rubio-Avila, R. Alcantara-Ramirez, J. Jaimes-Ponce, I. I. Siller-Alcala. *International journal of mathematics and computers in simulation*. Mexico, 2007. Vol. 1, iss. 2. P. 119-126.
7. Рациональні приводи підйомно-транспортних, дорожніх машин та логістичних комплексів: монографія / О. В. Григоров, В. В. Стрижак, Н. О. Петренко та ін.; за ред. О. В. Григорової. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. 352 с.
8. РД 22-166-86. Краны башенные строительные. Нормы расчета. СКТБ «Стройдормаш». Москва, 1987. 62 с.
9. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: МІНБУД УКРАЇНИ, 2006. 75 с.
10. Slew/translation positioning and swing suppression for 4-DOF tower cranes with parametric uncertainties: design and hardware experimentation / N. Sun, Y. Fang, H. Chen, B. Lu and Y. Fu. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016. № 63. P. 6407–6418.
11. Lawrence J. and Singhose W. Command shaping slewing motions for tower cranes. *Journal of Vibration and Acoustics*. 2010. № 132. 011002.
12. Radial-motion assisted command shapers for nonlinear tower crane rotational slewing / D. Blackburn, J. Lawrence, J. Danielson, W. Singhose, T. Kamoi and A. Taura. *Control Engineering Practice*. 2010. № 18. P. 523–531.
13. Duong S. C., Uezato E., Kinjo H. and Yamamoto T. A hybrid evolutionary algorithm for recurrent neural network control of a three-dimensional tower crane. *Automation in Construction*. 2012. № 23. P. 55–63.
14. Omar H. M. and Nayfeh A. H. Gain scheduling feedback control for tower cranes. *Journal of Vibration and Control*. 2003. № 9. P. 399–418.
15. Böck M. and Kugi A. Real-time nonlinear model predictive path-following control of a laboratory tower crane. *IEEE Transactions of Control Systems Technology*. 2014. № 22. P. 1461–1473.
16. Al-mousa A. A., Nayfeh A. H. and Kachroo P. Control of rotary cranes using fuzzy logic. *Shock and Vibration*. 2003. № 10. P. 81–95.
17. Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using a robust adaptive fuzzy control / T. S. Wu, M. Karkoub, W. S. Yu, C. T. Chen, M. G. Her and K. W. Wu. *Fuzzy Sets and Systems*. 2016. № 290. P. 118–137.
18. Sadati N. and Hooshmand A. Design of a gain-scheduling anti-swing controller for tower cranes using fuzzy clustering techniques. *International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation*. Sydney, Australia, 2006. P. 172–177.
19. Watany M., Eltantawie M. A. and Abouel-seoud S. A. Application of an adaptive neuro fuzzy inference system for low speed planetary gearbox vibration control. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2015. № 34. P. 323–341.
20. Kurczyk S. and Pawel M. Fuzzy control for semi-active vehicle suspension. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2013. № 32. P. 217–225.

21. Liu C., Zhao H. and Cui Y. Research on application of fuzzy adaptive PID controller in bridge crane control system. *IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science*. Beijing, China, 2014. P. 1–4.

22. Al-mousa A. A. Control of rotary cranes using fuzzy logic and time-delayed position feedback control, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2000.

23. Omar H. M. and Nayfeh A. H. Anti-swing control of gantry and tower cranes using fuzzy and time delayed feedback with friction compensation. *Shock and Vibration*. 2005. № 12. P. 73–89.

Стефанов Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-7947-2718. Тел.: +38 (068) 819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.

Держинський Ігор Віталійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0009-7188-2948. Тел.: +38 (095) 433-00-19.

E-mail: dzerzhynskiy@gmail.com.

Stefanov Volodymyr, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7947-2718.

E-mail: vstef@ukr.net.

Dzerzhynskiy Ihor, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID. iD: 0009-0009-7188-2948.

E-mail: dzerzhynskiy@gmail.com.

Статтю прийнято 11.11.2024 р.

УДК 534.6-8

РОЗВ'ЯЗАННЯ ХВИЛЬОВОГО РІВНЯННЯ В ЗАДАЧІ ПРО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХВИЛЬ У ДВОВИМІРНОМУ ШАРУВАТОМУ СЕРЕДОВИЩІ З МАЙЖЕ ІНВАРІАНТНИМ ВІДНОШЕННЯМ МАТЕРІАЛЬНО-ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Асист. О. В. Казанко, старш. викл. О. Є. Пенкіна

SOLUTIONS OF THE WAVE EQUATION IN PROPROPAGATION OF MECHANICAL WAVES PROBLEM IN A TWO-DIMENSIONAL LAYERED MEDIUM WITH ALMOST INVARIANT RELATION OF MATERIAL AND GEOMETRIC PARAMETERS

Assistant A. Kazanko, senior lecturer O. Penkina

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320674>

Анотація. Питання, розглянуті в роботі, зорієнтовані на перспективне створення напрацювань у галузі реалізації штучних властивостей у пружних внутрішньо структурованих (несуцільних) середовищах у зв'язку із розсіюванням у них механічних (акустичних) хвиль. Автори розвивають думку про те, що шарувате строго періодичне середовище може бути модифіковано за матеріальним і геометричним параметрами (розглянуто плоску необмежену вздовж періодичності модель середовища). Передумовою для розвитку цієї ідеї послужило припущення про існування інваріантних форм у дисперсійному рівнянні, що пов'язує параметри середовища з умовами розв'язності проблеми Штурма-

Ліувілля. Для реалізації зазначених модифікацій залучено апарат майже-періодичних функцій. Автори роботи вдаються до спроб розв'язати задачу на власні коливання (проблему Штурма-Ліувілля).

Ключові слова: проблема Штурма-Ліувілля, внутрішньо структуроване середовище, пружне середовище, шарувате середовище, метод матриці перенесення, скалярне хвильове рівняння, розповсюдження хвиль, ефект акустичного лінзування, майже-періодичні функції, функції Безіковича.

Abstract. The issues raised in the current work are oriented towards the prospective creation of developments in the field of realization of artificial properties in elastic internally structured (discontinuous) media in connection with the scattering of mechanical (acoustic) waves in them. The well-known principle of emergence predicts the appearance of properties in a system (in any system of arbitrary nature) that are not inherent to each constituent element separately. This principle encourages us to look at the realization of properties in these things precisely through the realization of structuredness. In particular, we are talking about elastic media in connection with the propagation of mechanical waves in them. The authors develop the opinion that a layered strictly periodic medium can be modified by material and geometric parameters (a flat model of the medium unlimited along the periodicity is considered). The premise for the development of this idea was the assumption of the existence of invariant forms in the dispersion equation (equations that connect the parameters of the environment with the conditions for the solvability of the Sturm-Liouville problem). For the implementation of these modifications, the apparatus of quasi-periodic functions is involved. Without going beyond the scope of generality, such an apparatus, in particular, allows you to formulate research results in terms inaccessible to the concepts of strictly periodic functions (almost-period, almost-root, almost equal, etc.). The authors of the paper resort to attempts to solve the problem on its eigen oscillations (the Sturm-Liouville problem), putting forward the idea of how to achieve the constituent condition of its solvability and, accordingly, write down the equation connecting this condition with the parameters of the environment (dispersion equation).

Keywords: Sturm-Liouville problem, internally structured medium, elastic medium, layered medium, transfer matrix method, scalar wave equation, wave propagation, acoustic lensing effect, quasi-periodic functions, Bezekovich functions.

Вступ. Сьогодні завдяки розвитку технологій 3D-друку та нанотехнології цікавість до внутрішньо структурованих середовищ продовжує зростати. До цих середовищ (матеріалів) застосовано термін «штучний» [1, 2]. Справа в тому, що наявність раніше не використовуваних властивостей у внутрішньо структурованих середовищах може бути пояснена принципом емерджентності – поява нових властивостей у структурах, тобто поява властивостей, не притаманних кожній окремій складовій певної структури. Світу, що оточує людину, притаманна питома структурованість – характерна риса всесвіту: кристали, молекули-полімери,

гірські магматичні породи (граніт), планетарні, зоряні системи, галактики є структурами в неживій природі, павутиння (властивості: міцність, шарнірність), бджолині стільники – у живій природі тощо. Структури можуть набувати властивостей не лише завдяки складовим елементам, а і характеру структурованості. Наприклад, твердий алмаз і м'який графіт складаються з одних і тих самих атомів вуглецю, але саме завдяки структурованості алмаз стає особливо твердим.

У випадку із середовищами не зовсім зрозуміло, що саме слід протиставити штучним внутрішньо структурованим середовищам. Якщо говорити про

структури, то в будь-якому разі слід говорити й про компоненти. Кожен компонент має свої властивості. Поєднання компонентів і встановлення стійких у часі відношень між цими компонентами (встановлення компонентного взаємозв'язку) є утворенням структури. Якщо якийсь відношення між компонентами або властивість компонента є штучною, то в такому разі справедливо говорити про штучне внутрішньо структуроване хвильове середовище (пружне механічне середовище). Вода або скло не є штучними внутрішньо структурованими субстанціями хвильового середовища, оскільки молекули води природно структуруються завдяки водневим зв'язкам, що виникають між атомами водню та кисню. Так само й сполуки SiO_2 утворюють монокристал (скло) завдяки ковалентним атомарним зв'язкам кремнію та кисню. Сухий лід отримують за штучних умов, але сам по собі діоксид вуглецю утворюється природно (на інших планетах сухий лід існує у відкритому вигляді).

У 2014 р. вченими Національної фізичної лабораторії у Великобританії Surrey NanoSystems на авіасалоні Фарнборо показали матеріал Vanta-Black (назва матеріалу походить від словосполучення Vertically Aligned NanoTube Arrays [1] – вертикально орієнтовані масиви нанотрубок і слова black – чорний). Як випливає з назви, матеріал складається з вертикально орієнтованих вуглецевих нанотрубок. Має низьку питому вагу, поглинає тепло, гідрофобний (водовідштовхувальна властивість), здатний триматися на воді (не тонути) за певної фізико-геометричної конфігурації, має високодобротні міцнісні характеристики, світло, що падає на матеріал, поглинає практично на 99.965 %, тому Vanta-Black відомий як щонайчорніший матеріал. Такий матеріал справедливо називати штучним внутрішньо структурованим матеріалом. І хоча зі зрозумілих причин виробники не розкривають деталі виготовлення матеріалу, проте характер розташування вуглецевих

нанотрубок (орієнтація) дає змогу упевнено говорити про штучне походження структури цього матеріалу.

Сьогодні не тільки за допомогою нанотехнологій, але й завдяки 3D-друку можна створювати матеріали зі штучною внутрішньою структурою, які, наприклад, використовують в акустиці для шумоізоляції або шумопоглинання (як-от за аналогією з Vanta-Black, тільки реалізована не світлопоглинальна, а звукопоглинальна функція), – відомий звуковий прожектор Ж. Мемолі, доцента Сассекського університету (Великобританія, 2019 р.). За словами групи розробників, для просторової маніпуляції звукових хвиль використовували матеріали, виконані за допомогою технологій 3D-друку [2]. Отже, протягом науково-технічного прогресу розширюються й можливості реалізовувати структурування матеріалів. Так само принцип емерджентності спонукає по-новому подивитися на розв'язання задач про розповсюдження механічних хвиль у середовищах з умовно простими матеріально-геометричними параметрами та відповідно мати обґрунтоване сподівання отримати нові властивості за подальшого поєднання в більш організовані розсіювальні структури [1].

У статті показано, що шарувате строго періодичне середовище (рис. 1) може бути модифіковано за матеріальним і геометричним параметрами. Для реалізації таких модифікацій залучено апарат майже-періодичних функцій (розглянуто плоску необмежену вздовж періодичності модель середовища). Автори роботи вдаються до спроб розв'язати задачу на власні коливання (проблему Штурма-Ліувілля) для модифікованих середовищ у функціональному гільбертовому просторі майже-періодичних функцій (просторі Безіковича). У роботі здійснюються пошуки інваріантних форм дисперсійного рівняння (рівняння, що пов'язує параметри хвильової задачі з умовами розв'язності проблеми Штурма-Ліувілля), записаного для строго періодичного середовища.

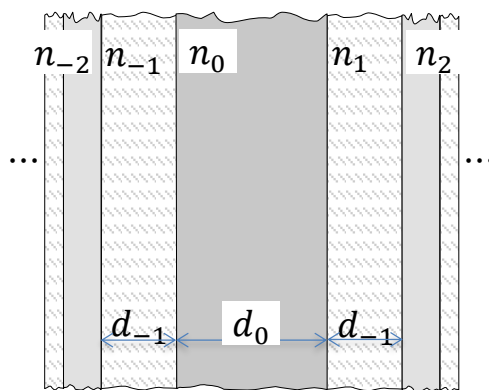


Рис. 1. Модель плоского модифікованого шаруватого середовища

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи [2-4] розвивають інтерес до внутрішньо структурованих середовищ, зокрема відомого з 2014 р. матеріалу Vanta-Black. У роботі [3] розглянуто строго періодичне шарувате середовище, отримано умову розв'язності проблеми Штурма-Ліувілля, наведено графіки амплітудно-просторових залежностей хвиль Флоке-Блоха. Відправною роботою теперішніх досліджень є робота [4], одним із головних результатів якої є доведення тези про можливість (побудова строго математичного підґрунтя) переходу від необмеженого періодичного середовища до середовища зі скінченною кількістю шарів. У цій роботі також зазначено, що дисперсійне рівняння періодичного середовища може бути записане через розв'язок спектрального диференціального рівняння в проблемі Штурма-Ліувілля:

$$\frac{1}{\mu} \dot{Z}_\beta \Big|_{\frac{d}{2}} - \frac{1}{\mu} \dot{Z}_\beta \Big|_{\frac{d}{2}-l} = \frac{1}{\mu} \dot{Z}_\beta \Big|_{\frac{d}{2}} = 0,$$

де Z_β – розв'язок спектрального рівняння;
 $(\frac{d}{2} - l, \frac{d}{2})$ – інтервал, що відповідає періоду середовища;

$\frac{d}{2}$ – точка, що відповідає межі розподілу шарів строго періодичного середовища;

$\mu = \mu(z)$ – скалярна кусково-стала періодична функція просторової змінної $z \in (-\infty, +\infty)$, являє собою матеріальний показник чергового шару – виникає з узгодженням площини коливання та введеної системи координат.

Така форма запису дисперсійного рівняння нашою думкою, що деякі властивості розв'язку Z_β перетикатимуть у дисперсійне рівняння. Власне, ідея про пошуки інваріантів для дисперсії походить саме від припущення про існування інваріантів самого розв'язку Z_β .

Перейдемо до проблеми Штурма-Ліувілля. Як відомо, така проблема може бути вирішена як спектральна проблема для лінійного диференціального оператора другого порядку [5, 6]:

$$LZ = -\beta^2 Z, \tag{1}$$

де $z_0 \in (-\infty, +\infty)$, L – лінійний диференціальний оператор другого порядку;

β – спектральний параметр. Як опорний функціональний простір виберемо гільбертів простір майже-періодичних функцій (простір Безіковича [6]).

Складовою умовою розв'язності проблеми Штурма-Ліувілля є умова

самоспряженості диференціального оператора L [5, 7]. Тому постає питання про виділення підпростору, у якому диференціальний оператор L є самоспряженим. Запишемо скалярний добуток двох функцій у просторі Безіковича (скалярний добуток адаптовано до умов вихідної задачі) [6]:

$$(u, v) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{z_0}^{z_0+T} \frac{1}{\mu} u \bar{v} dz, \quad (2)$$

де $z_0 \in (-\infty, +\infty)$ – довільне число;

$\mu = \mu(z)$ – скалярна кусково-стала майже-періодична функція просторової змінної $z \in (-\infty, +\infty)$, являє собою матеріальний показник чергового шару –

виникає з узгодження площини коливання та введеної системи координат.

Якщо говорити про розв'язання відповідного хвильового рівняння методом розділення змінних, то слід зазначити, що проблема Штурма-Ліувілля виникає лише в ортогональних системах координат, тому питання про введення системи координат так чи інакше є одним із відправних пунктів розв'язання хвильової задачі (або задачі на власні коливання). За визначенням, оператор L є самоспряженим у просторі H_0 , якщо для будь-якого $u, v \in H_0$ виконується рівність

$$(Lu, v) = (u, Lv).$$

Неважко показати, що

$$(Lu, v) - (u, Lv) = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{\mu} \dot{u} \bar{v} - u \frac{1}{\mu} \dot{\bar{v}} \right) \Big|_{z_0}^{z_0+T}.$$

Справді,

$$(Lu, \bar{v}) = \frac{1}{T} \left[\int_{z_0}^{z_0+T} \left(\frac{1}{\mu} \dot{u} \right)' \bar{v} dz + k^2 \int_{z_0}^{z_0+T} \bar{v} n^2 u dz \right],$$

$$(u, L\bar{v}) = \frac{1}{T} \left[\int_{z_0}^{z_0+T} u \overline{\left(\frac{1}{\mu} \dot{v} \right)'} dz + k^2 \int_{z_0}^{z_0+T} \bar{v} n^2 u dz \right].$$

Оскільки (інтегруємо частинами)

$$\int_{z_0}^{z_0+T} \left(\frac{1}{\mu} \dot{u} \right)' \bar{v} dz = \frac{1}{T} \frac{1}{\mu} \dot{u} \bar{v} \Big|_{z_0}^{z_0+T} - \frac{1}{T} \int_{z_0}^{z_0+T} \frac{1}{\mu} \dot{u} d\bar{v},$$

$$\int_{z_0}^{z_0+T} u \overline{\left(\frac{1}{\mu} \dot{v} \right)'} dz = \frac{1}{T} u \frac{1}{\mu} \dot{\bar{v}} \Big|_{z_0}^{z_0+T} - \frac{1}{T} \int_{z_0}^{z_0+T} \frac{1}{\mu} \dot{\bar{v}} du,$$

то

$$(Lu, v) - (u, Lv) = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{\mu} \dot{u} \bar{v} - u \frac{1}{\mu} \dot{\bar{v}} \right) \Big|_{z_0}^{z_0+T}.$$

Отримали умову щодо функцій, для яких оператор є самоспряженим.

Визначення мети та завдання дослідження. Авторам цікаво розглянути і кількісно дослідити поведінку механічних

хвиль у середовищах, які передбачено є модифікацією строго періодичного середовища. По-перше, ідея полягає в тому, щоб інтеграл у скалярному добутку подати як

$$(u, v) = \frac{1}{T_n} \sum_{m=0}^n \int_{T_{m-1}}^{T_m} \frac{1}{\mu} u \bar{v} dz = 0,$$

де $T_n = l_n + T_{n-1}$, $T_0 = z_0$, l_n – часткові періоди в точці z_0 , $n = 1, 2, \dots$.

Це можливо, адже границя, за Гейне, означає, що будь-яка послідовність τ_n така, що $\tau_n \rightarrow \infty$ дає границю

$$\frac{1}{\tau_n} \int_{z_0}^{z_0 + \tau_n} \frac{1}{\mu} u \bar{v} dz \rightarrow (u, v).$$

Зокрема, за $\tau_n = T_n$ і з урахуванням адитивності інтеграла запишемо

$$(Lu, v) = \frac{1}{T} \int_{z_0}^{z_0 + T} \frac{1}{\mu} u \bar{v} dz = \frac{1}{T_n} \sum_{m=0}^n \int_{T_{m-1}}^{T_m} \frac{1}{\mu} u \bar{v} dz.$$

Звідси виникає надія про виконання умов самоспряженості диференціального оператора L і можливість отримання розв'язків проблеми Штурма-Ліувілля у виділеному підпросторі H_0 опорного простору H . За припущенням авторів, кожен доданок $I_m(\beta) = \frac{1}{\mu} \dot{u}_\beta \Big|_{T_{m-1}}^{T_m}$ наступної суми є досить близьким до нуля, а повна сума, яка в ідеалі є нескінченною сумою, має дорівнювати нулю:

$$\frac{1}{T_n} \sum_{m=1}^n \frac{1}{\mu} \dot{u}_\beta \Big|_{T_{m-1}}^{T_m} = 0.$$

Тобто припущення полягає в тому, щоб досягти виконання умови

$$\frac{1}{T_n} \sum_{m=0}^n \left(\frac{1}{\mu} \dot{u} \bar{v} - u \frac{1}{\mu} \dot{\bar{v}} \right) \Big|_{T_{m-1}}^{T_m} = 0,$$

або

$$(Lu, v) - (u, Lv) = 0.$$

Остання рівність означає, що оператор L є самоспряженим. Маємо простір, у якому оператор L є самоспряженим:

$$H_0 = \left\{ u \in H, \frac{1}{\mu} \dot{u}_\beta \Big|_{T_{m-1}}^{T_m} \approx 0, m = 0, 1, \dots \right\}.$$

Функції знов побудованого простору існують H_0 як майже-періодичні.

Основна частина дослідження. Побудуємо два модельних приклади. Як

було показано в роботі [4], задача на власні коливання для шаруватого строго періодичного середовища (плоска модель) ніби розпадається на відповідні незалежні

задачі на кожному окремому шарі. Ця обставина нашоує на думку про існування можливості модифікувати середовище. Побудова першого модельного прикладу полягає у зміні матеріального

параметра n_m . Як виявилось, така модифікація не призводить до значної зміни самої функції-розв'язку u_β і дисперсійної залежності $I_m(\beta)$ (за спектральним параметром β) (рис. 2).

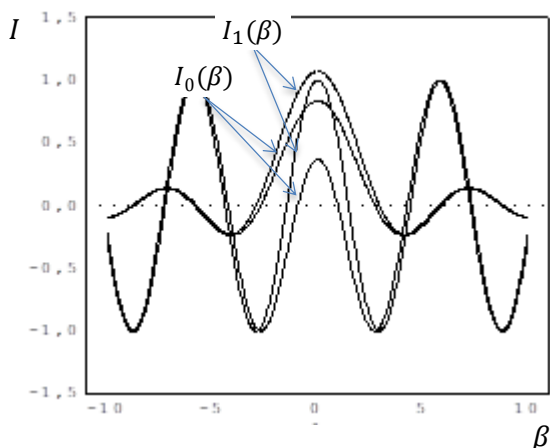


Рис. 2. Дисперсійні криві $I_0(\beta)$, $I_1(\beta)$, які відповідають двом суміжним шарам (модельний приклад 1, переставлено 2-ї модифікації за матеріальним параметром)

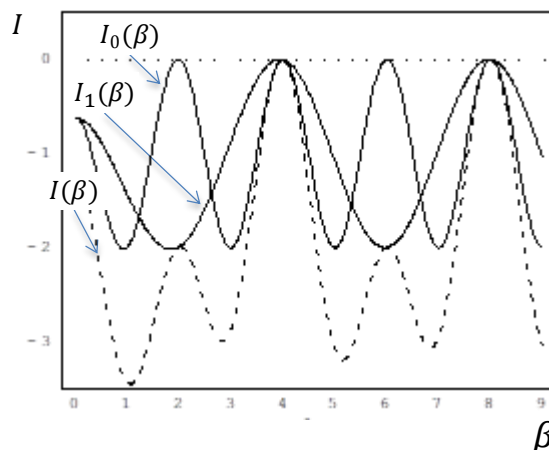


Рис. 3. Дисперсійні криві $I_0(\beta)$, $I_1(\beta)$, які відповідають двом суміжним шарам (суцільні лінії), $I(\beta) = I_0(\beta) + I_1(\beta)$ – результуюча дисперсійна крива (пунктирна лінія)

Інша думка полягає у спробах зрозуміти (другий модельний приклад), чи можливі інваріанти дисперсійних залежностей $I_0(\beta) = \frac{1}{\mu} \dot{u}_\beta \Big|_{T_0}^{T_1}$, $I_1(\beta) = \frac{1}{\mu} \dot{u}_\beta \Big|_{T_1}^{T_2}$, записаних відповідно для двох суміжних шарів ($m = 0, 1$). Дивлячись на останню форму запису дисперсійних залежностей, неважко дійти висновку, що інваріанти самого розв'язку u_β спектрального рівняння (1) можуть виявитися й інваріантами дисперсійних рівнянь $I_0(\beta)$, $I_1(\beta) = 0$. Звісно, прикладів яких-небудь інваріантних форм навести нескладно, припустимо, змінити матеріальний параметр n , а разом із тим і частотний параметр k так, щоб добуток kn не змінився. Але, схоже, корисних інваріантів для розв'язання

вихідної спектральної проблеми вказати не вдається. Проте, якщо долучити апарат майже-періодичних функцій, побачити дещо схоже на інваріантні значення розв'язку u_β усе ж таки можливо. Нехай $\beta = \beta_p$, (p – деякий цілий індекс), тоді з переходом у геометричному параметрі від d до $2d$ і в матеріальному параметрі від n_0 до $n_1 = \frac{n_0}{2}$ матимемо $u_{\beta_p}(n_0, d) = u_{\frac{1}{2}\beta_p}(n_1, 2d)$ (тут для визначеності узято два суміжних шари за $m = 0, 1$). Зокрема, якщо β_p – корені рівняння $I_0(\beta) = 0$, то $\frac{1}{2}\beta_p$ є коренями рівняння $I_1(\beta) = 0$.

Якби функція u_β була б строго періодичною (за спектральним параметром β), то $\beta_p = \beta_0 + pl$, (l – період) і тоді мали

$$I_1\left(\frac{1}{2}\beta_p\right) \equiv I_1\left(\frac{1}{2}\beta_0 + \frac{1}{2}pl\right) \equiv I_1(ql + sl) = 0$$

(за умови, що β_0 пропорційне періоду l : $\beta_0 = ql$, q – ціле, $s = \frac{1}{2}p$). У цьому випадку значення були б

$$I\left(\frac{1}{2}\beta_p\right) = I_0(ql + sl) + I_1(ql + sl),$$

тобто за парних значень індексу p , q мали б такі β , які були б коренями як рівняння $I_0(\beta) = 0$, так і рівняння $I_1(\beta) = 0$, а отже, і рівняння $I(\beta) \equiv I_0(\beta) + I_1(\beta) = 0$ (рис. 3). Якби така логіка була дійсною, то значенням спектрального параметра β_p , що відповідають парним індексам p , q , відповідали б власні функції u_{β_p} (власні коливання) двох суміжних шарів ($m = 0, 1$). Але дійсність є дещо складнішою.

Втім, залучаючи апарат майже-періодичних функцій, значення параметра β_p справедливо називати майже-коренями. У реальності $\beta_p \approx \beta_0 + pl$ – рівність буде виконуватися наближено. Тож для двох суміжних шарів маємо спектральну залежність $I(\beta) = I_0(\beta) + I_1(\beta)$. Стає зрозумілим, що в термінах майже-періодичних функцій числа β_p , які є точними коренями спектрального рівняння $I(\beta) = 0$, є майже-коренями відповідно рівнянь $I_0(\beta)$, $I_1(\beta) = 0$, тобто відповідні розв'язки u_{β_p} спектрального рівняння (1) належать простору H_0 , у якому диференціальний оператор L є самоспряженим, а отже, розв'язки спектрального рівняння u_{β_p} є власними функціями спектральної проблеми (1) (власними коливаннями середовища, яке являє собою поєднання шарів з індексами $m = 0, 1$).

На рис. 3 подано графіки двох дисперсійних кривих

$$I_0(\beta) = \frac{1}{\mu} \dot{u}_\beta \Big|_{T_0}^{T_1}, \quad I_1(\beta) = \frac{1}{\mu} \dot{u}_\beta \Big|_{T_1}^{T_2},$$

що відповідають суміжним шарам (абсцис – значення спектрального параметра β , ординат – дисперсія). Із рисунка видно, що

залежність $I(\beta) = I_0(\beta) + I_1(\beta)$ наближено обертається в нуль (пунктир) у точках, де відповідно обертаються в нуль залежності $I_0(\beta)$, $I_1(\beta)$, тобто ці точки є майже-коренями залежності $I(\beta)$, отже, розв'язки спектрального рівняння (1), які відповідають цим кореням, належать простору H_0 і є власними функціями.

Висновки. У роботі було розглянуто два модельних приклади (плоска модель середовища). У першому розглянуто модифікацію строго періодичного середовища за матеріальним параметром. У другому прикладі розглянуто середовище, у якому модифікуються матеріальний і геометричний параметри (довжина шару). Для обох прикладів формулюють і розв'язують задачу на власні коливання. Спектральну проблему Штурма-Ліувілля розв'язують у функціональному гільбертовому просторі майже-періодичних функцій (просторі Безіковича).

У першому модельному прикладі реалізовано модифікацію, у якій хвильове середовище залишається необмеженим. Тут зміна матеріального параметра не призводить до сильної зміни дисперсійної залежності, записаної для окремого шару. Розглянута у другому модельному прикладі модифікація менш очевидна та, на думку авторів, заслуговує на більшу увагу. У вигляді графіків для цих прикладів також було подано дві дисперсійні залежності відповідно двох суміжних шарів. На графіках наочно визначено зв'язок між коренями цих двох дисперсій. З побудовою другого модельного прикладу розвивається ідея про існування можливих інваріантних форм дисперсійного рівняння, записаного для окремо вибраних шарів. У ході досліджень з'ясовано, що знайти інваріанти в повному розумінні цього терміна, як здається натепер, неможливо. Утім, залучаючи апарат майже-періодичних функцій, усе ж таки вдається вказати окремі точки – значення спектрального параметра β , для яких справджується точкова

інваріантність: $I_0(\beta_p) = I_1(\frac{1}{2}\beta_p)$ (p – цілий індекс). Намагаючись розповсюдити отриманий результат на середовище з нескінченною кількістю шарів, така ідея стикається з труднощами – перший корінь дисперсійного рівняння виявляється нескінченно віддаленим (з додаванням

чергового шару до середовища перший корінь зростає), у зв'язку з чим автори обмежуються лише декількома шарами для матеріального $n_m = 5, \frac{5}{2}, \frac{5}{4}, \frac{5}{8}, \frac{5}{16}$ і геометричного параметрів $d = .25, .5, 1, 2, 4$ (m – індекс, що характеризує номер шару, $m = 0, 1, 2, 3, 4$).

Список використаних джерел

1. Arnold Adams, Fred Nicol, Steve McHugh, John Moore, Gregory Matis, Gabriel A. Amparan. Vantablack properties in commercial thermal infrared imaging systems. Proc. SPIE 11001, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXX, 110010W (14 May 2019). URL: <https://doi.org/10.1117/12.2518768>.
2. Morozov G. V., Sprung D. W. L. Floquet-Bloch waves in one-dimensional photonic crystals. *EPL (Europhysics Letters)*. 2011. Nov. 22; 96(5): 54005. URL: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/96/54005>.
3. Mimoli G. A transfer matrix method for calculating the transmission and reflection coefficient of labyrinthine metamaterials. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 151, 1022 (2022). doi: 10.1121/10.0009428.
4. Казанко О. В., Пенкіна О. Є. Розповсюдження механічних хвиль у двовимірному шаруватому середовищі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. Вип. 205. С. 25-36.
5. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. Изд. 4-е. Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 512 с.
6. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики: учеб. пособ. Изд. 6-е, испр. и доп. Москва: Издательство МГУ, 1999. 742 с.
7. Ахиезер Н. И., Глазман И. М. Теория линейных операторов в гильбертовых пространствах: книга для специалистов, аспирантов математ. специальностей. Изд. 2-е. Москва: Наука, 1966. 544 с.
8. Eastham M. S. P. The spectral theory of periodic differential equations. Edinburg: Scottish Academic Press, 1973. 130 p.
9. Winkler S., Magnus W. Hill's Equation. New York, London, Sydney: Interscience Publisher a division John Wiley & Sons, 1996. 135 p.
10. Левитан Б. М. Почти-периодические функции: монография. Москва: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1953. 396 с.
11. Казанко О. В., Пенкіна О. Є. Диференціювання поперечних розв'язків хвильового рівняння по подовжньому хвильовому числу в дифракційній задачі для необмеженого рівняння по подовжньому хвильовому числу в дифракційній задачі для необмеженого періодичного шаруватого середовища з метаматеріалом. *Збірник наукових праць ЛОГОС*. 2020. С. 126-130.
12. Казанко О. В., Пенкіна О. Є. Норма власних функцій одновимірного фотонного кристала. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2021. № 35. С. 86-93. URL: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-08>.

13. Казанко О. В., Пенкіна О. Е. Розповсюдження плоскої монохроматичної електромагнітної хвилі у двовимірному однорідному ізотропному середовищі з дискретною будовою. *Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження»*. Івано-Франківськ, 2020. Т. 1. С. 122-124.

Казанко Олександр Віталійович, асистент кафедри обчислювальної техніки та систем управління, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9202-8008>.

Тел.: +38 (057) 730-10-40. E-mail: kazanko@kart.edu.ua.

Пенкіна Ольга Євгенівна, старший викладач кафедри обчислювальної техніки та систем управління,

Український державний університет залізничного транспорту. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9804-6685>.

Тел.: +38 (057) 730-10-40. E-mail: penkina@kart.edu.ua.

Kazanko Alexander, Assistant, Department of Computer Engineering and Control Systems, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9202-8008>. Tel.: +38 (057) 730-10-40.

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

Penkina Olga, Senior Lecturer, Department of Computer Engineering and Control Systems, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9804-6685>. Tel.: +38 (057) 730-10-40.

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

Статтю прийнято 10.12.2024 р.

УДК 539.3

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РОБОЧОЇ ДЕТАЛІ З ОЗНАКАМИ МЕХАНІЧНИХ ПОШКОДЖЕНЬ

Кандидати техн. наук В. П. Раківненко, А. В. Колісник

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE LEVEL OF PERFORMANCE OF A WORKING PART WITH SIGNS OF MECHANICAL DAMAGE

PhD (Tech.) V. Rakivnenko, PhD (Tech.) A. Kolisnyk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320676>

Анотація. Практика свідчить, що наявність тріщини ще не означає втрату несучої здатності конструкції: до критичного розміру тріщини пошкодження може бути безпечним, якщо є можливість виявити і відслідкувати розвиток дефекту, що буде обґрунтуванням подальшої експлуатації високовартісного об'єкта. У статті розглянуто метод визначення рівня працездатності навантаженої деталі через аналітичне знаходження небезпечного його стану за допомогою коефіцієнтів інтенсивності напружень, які є чисельною характеристикою механічних пошкоджень. Ураховуючи складність розглянутої задачі, розв'язання проводимо методом енергетичного балансу.

Ключові слова: працездатність, механічні пошкодження, втомленість, енергетичний баланс, теорії міцності.

Abstract. The article discusses the urgent problem of the operability of a working part with signs of mechanical damage in the form of cracks, which negatively affects the performance of the object. Premature, sometimes sudden destruction occurs even when subjected to minor loads. The

purpose of the article is to analytically determine the critical state of a structural element in terms of its performance through stress intensity factors (SIF), which are a numerical characteristic of the material's crack resistance.

Cracks can be technological: they occur during casting, forging, welding, as well as acquired; during installation of the object or operation (from overload), The occurrence of cracks also depends on the type of load: static, alternating and dynamic; on the type of deformation: tension-compression, shear, torsion, bending, as well as on the physical and mechanical characteristics of the material and the geometry of the object.

Practice shows that the presence of a crack does not mean the loss of the bearing capacity of the structure: damage up to a critical crack size can be safe if it is possible to detect and track the development of the defect, which will justify the further operation of the valuable object.

Given the complexity of the problem under consideration, we solve it using the energy balance method. Its essence is as follows.

Elastic bodies accumulate mechanical energy potential during deformation. It cannot disappear without a trace, and in the presence of a crack, it is accumulated by the surfaces of its banks, or rather in the tension deformation of these banks, which leads to the development of a crack.

The critical state of crack resistance is determined by the ratio between the stress intensity coefficients (SIC), which reflect the size of the crack and the acting stresses. In this case, the structure will be inoperable, or such that the destruction process can be prolonged in time.

Key words: performance, mechanical damage, fatigue, energy balance, strength theory.

Вступ. Експлуатація багатьох відповідальних споруд і конструкцій, таких як мости, вежі, літальні апарати і багато інших об'єктів, свідчить про явища передчасного, іноді і раптового, їх руйнування навіть за дії незначних навантажень у результаті отримання робочими деталями механічних пошкоджень. Процес руйнування супроводжується зазвичай появою тріщин і, нерідко, з лавинним їх розростанням.

У поданій вище картині руйнування основною причиною є наявність первинних дефектів будови матеріалу: мікропори, мікротріщини, які зародилися задовго до повного руйнування матеріалу.

Тріщини можуть бути технологічними, що виникають у процесі лиття, кування, зварювання, а також такими, що виникли з монтажем об'єкта або експлуатацією (від перевантаження).

Вплив тріщини на працездатність деталі залежить від виду навантаження: статичне, знакозмінне і динамічне; типу деформації: розтяг-стиск, зсув, згин, кручення, а також фізико-механічних характеристик матеріалу і геометрії об'єкта.

Практика свідчить, що наявність тріщини ще не означає втрату несучої здатності конструкції: до критичного розміру тріщини пошкодження може бути безпечним, якщо є можливість виявляти і відслідковувати розвиток дефекту, що може бути обґрунтованим подальшою експлуатацією високовартісного об'єкта, тим більше, що процес руйнування може бути пролонгованим у часі. Цей факт є особливо важливим, коли відбуваються бойові дії і боєздатність техніки та озброєння має бути прогнозованою. Тому фахівцям-практикам необхідно бути обізнаними в цих питаннях хоча б у межах методики, розглянутої в статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання прогнозування втомленої міцності матеріалів було і залишається актуальним протягом століття. У результаті досліджень, виконаних у галузі механіки руйнування, як закордонними вченими А. Гріффітсем, Г. Орованом, Дж. Ірвіним, так і вітчизняними С. В. Серенсенем, Б. Я. Кантором, Ю. І. Кудишиним, В. В. Панасюком, Е. М. Морозовим та іншими, механіка

руйнування досягла високого рівня розвитку і пропонує ґрунтовні методи розв’язання інженерних задач з розрахунку на міцність деталей із тріщинами.

Більшість дослідників із цього питання використовували відомі теорії міцності [2-4], недоліком яких є неспроможність повноцінно пояснити негативний вплив тріщини на зниження працездатності елементів конструкцій. Із запропонованих найбільш ефективним у вирішенні проблеми виявився енергетичний підхід (четверта теорія міцності), за яким на основі механіки пружного суцільного середовища молодим англійським аспірантом А. Гріффітсом у 1920 році була розроблена теорія руйнування крихкого матеріалу, що мав тріщину [1].

Метою статті є аналітичне визначення критичного стану елемента конструкції відносно його працездатності через коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН), які є чисельною характеристикою тріщиностійкості матеріалу.

Основна частина дослідження. Відомо, що пружні тіла в процесі деформації накопичують потенціал механічної енергії, якої вони прагнуть позбутися, за принципом мінімуму стабільного енергетичного поля.

Поверхня твердого тіла як об’єкт існування має силу поверхневого натягіння, внаслідок чого вона з деформацією акумулює реальну механічну енергію.

Для рідини цей ефект наочний, а для твердого тіла – не очевидний. Тверді тіла досить жорсткі відносно деформуваці зсуву, і тому їхня форма суттєво не зміниться під дією сил поверхневого натягіння.

Розглянемо сутність енергетичного підходу до питання тріщиностійкості матеріалу. Маємо тонку пластину постійної товщини δ в одновісному полі

розтягувальних напружень σ . Матеріал пластини крихкий, але підпорядковується закону Гука аж до моменту руйнування.

Припустимо виникнення в ній із будь-якої причини наскрізь гострокінцевої тріщини довжиною $2l$ і перпендикулярною до осі навантаження (рис. 1).

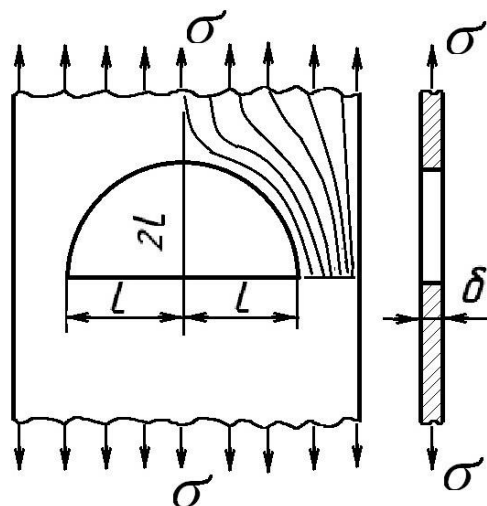


Рис. 1. Графічне зображення тріщини і силового поля

Береги тріщини як поверхні зазвичай звільнені від дії нормальних напружень σ . У силовому полі навколо тріщини виявилася зона розвантаження у вигляді еліпса з півосями l і $2l$, де напруження зменшуються до нуля [2]. Площа еліпса $S = \pi \cdot a \cdot b = 2 \cdot \pi \cdot l^2$, а об’єм зони розвантаження $V = S \cdot \delta = 2 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot \delta$. Цей об’єм у пластині виявився вільним від пружної енергії за будь-якого σ .

За теоремою Клайперона, питома енергія деформації $u = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E}$, де E – модуль Юнга. Тоді енергія, яка звільниться у зоні розвантаження, дорівнюватиме

$$U_{зв} = u \cdot v = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot \delta = \pi \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot l^2 \cdot \delta. \quad (1)$$

Ця енергія не може зникнути безслідно, тому в межах локального енергетичного балансу в зоні тріщини вона, природно, акумульована поверхнями берегів самої тріщини.

Частина акумульованої енергії витрачається на поверхневе натягнення берегів тріщини [3]:

$$U_{nn} = f \cdot \chi = 4 \cdot l \cdot \delta \cdot \chi, \quad (2)$$

де $f = 4 \cdot l \cdot \delta$ – площа берегів тріщини;
 χ – питома енергія натягнення поверхонь берегів.

Без урахування можливої дисипації енергії можна записати рівняння

$$U(l) = -U_{зв} + U_{nn} = -\pi \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot l^2 \cdot \delta + 4 \cdot l \cdot \delta \cdot \chi. \quad (3)$$

Оскільки перехід у критичний стан стійкого розвитку тріщини супроводжується мінімальним поглинанням

енергії, тому критичну довжину тріщини l_c знайдемо з мінімуму функціонала (3) за l :

$$\frac{\partial}{\partial l} U(l) = -2 \cdot \pi \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot l \cdot \delta + 4 \cdot \delta \cdot \chi = 0,$$

звідки

$$l_c = \frac{2 \cdot \chi \cdot E}{\pi \cdot \sigma^2}. \quad (4)$$

Критичній довжині тріщини l_c відповідає критичне значення напруження σ_c

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \chi \cdot E}{\pi \cdot l_c}}. \quad (5)$$

Отже, чим менше значення σ_c , тим більший критичний розмір l_c . За меншої початкової довжини тріщини l можуть бути реалізовані більші напруження σ_c без зростання самої тріщини. Саме з цієї причини реальні матеріали мають певний запас міцності, незважаючи на наявність у них тріщин та інших дефектів (рис. 2) [4].

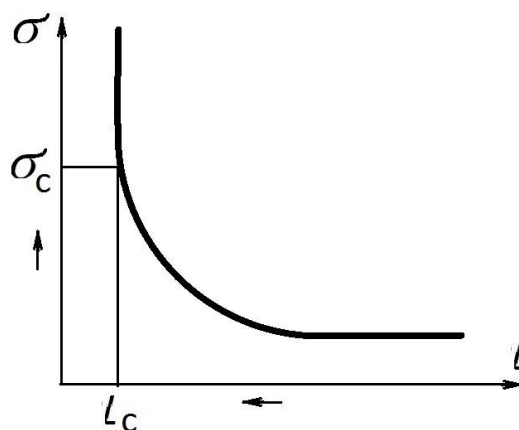


Рис. 2. Залежність міцності матеріалу від довжини тріщини

З вище наведеного випливає, що задача тріщиностійкості має складне аналітичне розв'язання внаслідок складності визначення параметра χ , який

відомий для конструкційних матеріалів лише на рівні порядку їхніх величин [5].

Слід урахувати той факт, що конструкційні матеріали в критичному стані деформування переважно набувають пластичних властивостей ($\sigma_{np} < \sigma_c \leq \sigma_T$) у зонах концентрації напружень – на кінцях тріщини.

Хоча теорія А. Гріффітса стосується лише крихких матеріалів, але американський учений Е. Орован [6] у 1950 році запропонував урахувати пластичну роботу поверхней тріщини в рамках теорії А. Гріффітса, надавши поверхневій енергії χ ширшого змісту і подавши її як суму

$$\chi = \chi_{кр} + \chi_{пл}, \quad (6)$$

де $\chi_{кр}$ – питома енергія крихкої фази деформації;

$\chi_{пл}$ – питома енергія пластичної фази деформації.

Саме в цьому і полягає концепція квазікрихкості критичного стану деформованого тіла. Вона відображує реальну поведінку матеріалів.

Експериментально встановлено [6], що пластична деформація поверхневого шару тіла $\chi_{пл}$ на три порядки перевищує величину $\chi_{кр}$. Тому останньою можна знехтувати і формулу (5) записати як

$$\chi = \chi_{пл}. \quad (7)$$

Рівняння (4) можна ще записати в еквівалентній йому формі [7], поділивши параметри за категоріями через коефіцієнт інтенсивності напружень K (KIH):

$$\sqrt{\pi \cdot l} \cdot \sigma \leq \sqrt{2 \cdot \chi \cdot E}$$

або

$$K = \sqrt{\pi \cdot l} \cdot \sigma \leq K_c = \sqrt{2 \cdot \chi \cdot E}. \quad (8)$$

Коефіцієнт K (ліва частина рівняння (8)) відображує «силовий критерій» критичного стану – геометричний (розмір тріщини l) і механічний фактори (напруження σ).

Щодо правої частини рівняння (8), то коефіцієнт K_c пов'язаний із «в'язким руйнуванням»; він є чисельною характеристикою тріщиностійкості матеріалу.

Відомо, що в'язкість властива складному, неоднорідному матеріалу, який гальмує розвиток тріщини; тоді як однорідний матеріал, будучи крихким, є менш тріщиностійким [8].

Умова (8) – достатньо надійний критерій оцінювання тріщиностійкості матеріалу, оскільки загроза появи критичного стану деталі з тріщиною описана інтенсивністю поля напружень σ у вершинах тріщини, а початок швидкого розвитку тріщини визначений умовою $K \geq K_c$.

Висновки. Наявність ефективних методів визначення величин K_c із наданням їм унормованого статусу для різних матеріалів і умов навантаження можна вважати передумовою для розрахунку конструкцій на тріщиностійкість у межах KIH у порядку задоволення нерівності (8) із знанням властивостей матеріалу елемента конструкції, його геометрії та виду навантаження.

Запропонований метод дає змогу через співвідношення коефіцієнтів напруження за наявності тріщини визнати конструкцію або непрацездатною, або такою, що процес руйнування її може бути пролонгованим у часі. Останнє посилення означає екстремальні умови застосування техніки, наприклад бойові дії, коли пролонгування працездатності пошкодженого об'єкта може бути вирішальним у досягненні успіху.

Оскільки це посилення не набуло ще достатньої уваги науковців, у подальшому

воно може бути темою ґрунтового дослідження.

Список використаних джерел

1. Griffith A. A. The phenomener of rupture and flow in solids, Phil. Trans Roy Soc. A 221. 1920. P. 163-168. URL: <https://mbarkey.eng.ua.edu/courses/AEM644/Griffith1921fracture.pdf>.
2. Долгов О. М. Механіка руйнування: підручник / Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. 166 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/288815547.pdf>.
3. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев: Наукова думка, 1968. 246 с.
4. Панасюк В. В. Разрушение элементов конструкций с несквозными трещинами. Киев: Наукова думка, 1991. 172 с.
5. Irwin G/R/ Fracture dynamics. «Fracture of Metals», ASM, Cleveland, 1948. P. 149-166.
6. Кантор В. Я., Стрельникова Е. А. Гіперсингулярні рівняння в задачах механіки суцільного середовища. Харків: Нове слово, 2005. 252 с.
7. Orowan E. O. Fundamental of erittle behavior of metals. «Fatigue and Factice of Metals». Wiley. New York, 1950. P. 139-167.
8. Кудишин Ю. И., Дробот Д. Ю. Живучесть конструкций в аварийных состояниях. *Металлические здания*. 2008. № 5. С. 21-23.

Раківненко Валерія Павлівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України. <https://orcid.org/0000-0002-6136-6191>.
E-mail: Valeryakivnenko@gmail.com.

Колісник Аліна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України. <https://orcid.org/0000-0001-5038-0230>. Тел.: 0662331644.
E-mail: allinchic26@gmail.com.

Rakivnenko Valeriya PhD (Tech.), Associate Professor, head of the department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine. ORCID ID [0000-0002-6136-6191].
E-mail: Valeryakivnenko@gmail.com.
Kolisnyk Alina, PhD (Tech.), Associate Professor, head of the department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine ORCID ID [0000-0001-5038-0230]. Tel.: 093-734-41-20.
E-mail kolisnuk@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 13.12.2024 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 621.7; 658.5

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ПОВНОЇ МНОЖИНИ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ДОСЯГНЕННЯ БІЗНЕСОМ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Кандидати техн. наук Г. В. Біловол, А. О. Каграманян, О. В. Василенко,
асист. А. В. Онищенко

DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE COMPLETE SET OF METHODS FOR ENHANCING ENERGY EFFICIENCY IN PRODUCTION SYSTEMS AS A TOOL FOR ACHIEVING BUSINESS SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

PhD (Tech.) H. Bilovol, PhD (Tech.) A. Kagramanian, PhD (Tech.) O. Vasylenko,
A. Onishchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320702>

***Анотація.** Показано доцільність створення механізмів та інструментів, які спростять представникам малого і середнього бізнесу перехід до сталої моделі функціонування. Класифіковано джерела втрат енергетичних ресурсів на різних ділянках виробничих систем. Розроблено алгоритм виявлення структурної моделі множини способів підвищення енергоефективності виробничих систем. Обґрунтовано доцільність формування такої множини в найбільш узагальненій формі з необхідністю подальшої конкретизації її структурних елементів. Показано, що модель повної множини способів підвищення енергоефективності виробничих систем включає дев'ять загальних структур способів підвищення ефективності. Наведено приклади заходів, які дадуть змогу реалізувати виявлені способи для роботи газової промислової котельні, яка забезпечує теплотою систему опалення.*

***Ключові слова:** цілі сталого розвитку, виробнича система, підвищення енергетичної ефективності, модель множини способів.*

***Abstract.** The article analyzes the success of Ukraine in achieving its set goals in energy efficiency and clean energy. It was found that out of seven indicators, three showed negative dynamics, and some positive results were achieved only due to a reduction in production in energy-intensive sectors of the economy. An analysis of Ukrainian companies' reports on achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) for 2016–2019 revealed a low readiness of businesses for significant changes to achieve SDG 7, «Affordable and Clean Energy». The share of businesses prioritizing this area is 0 %. The necessity of creating mechanisms for small and medium-sized enterprises to simplify the transition to a sustainable operating model has been demonstrated.*

The article proposes the development and implementation of a specialized software tool, which will allow businesses to independently assess and navigate energy efficiency opportunities.

A Model of the Complete Set of Methods for Enhancing Energy Efficiency in Production Systems has been developed. The model was created using a system-process approach and includes nine general structures of methods for enhancing efficiency. The initial basis for determining the set

of methods is the set of production system objects and the set of techniques that ensure the transition to low-carbon and energy-efficient processes.

The purpose of the Model is to establish a theoretical foundation for creating a database with a comprehensive range of potential energy efficiency improvement solutions. The developed databases are also expected to be used in subsequent software product development.

The article provides examples of technical and organizational measures to implement the identified methods, using the operation of an industrial boiler house as a case study.

The application of the developed Model in software products enables a formalized, targeted search for methods to improve energy efficiency from the full range of possible solutions (within the adopted classification framework).

Keywords: *sustainable development goals, production system, improving energy efficiency, model of a set of methods.*

Вступ. Затверджений ООН Порядок денний до 2030 року «План дій для людей, планети та процвітання» поставив перед усіма країнами складні та амбіційні завдання щодо забезпечення сталого розвитку [1]. Цим планом було визначено стандарти якості життя, які мають бути забезпечені для всіх людей до 2030 року. Серед іншого цим документом було встановлено вимоги до стану навколишнього середовища, досягнення соціальної рівноваги в суспільстві та поставлено завдання щодо створення сприятливого середовища для розвитку партнерських відносин між країнами й соціальними групами (бізнес, влада, суспільство). У цьому трикутнику бізнес є найбільш уразливою групою.

Сучасний характер відносин між державою та представниками бізнесу в Україні досі має ознаки посттоталітарної моделі, яка багато в чому протирічить засадам сталості. Тому коли йдеться про традиційне державне регулювання у сфері досягнення цілей сталого розвитку, нерідко бізнес опиняється перед суттєвими викликами. Особливі ризики тут існують для малого і середнього бізнесу. Для розроблення нової бізнес-моделі, яка б урахувувала засади сталості, слід залучати нові ресурси, підвищувати рівень обізнаності працівників, змінювати культуру відносин із внутрішніми і

зовнішніми стейкхолдерами, оновлювати технології тощо.

Беручи до уваги умови недружнього середовища, у якому функціонує сучасний бізнес, вкрай важливим є розвиток двох механізмів регулювання розвитку сталості:

1. Механізм державного регулювання «згори вниз», як процес узгодженого впливу на галузь економіки із застосуванням послідовних відповідних процедур та інструментів, що забезпечать безпечний перехід компаній від старого до нового стану.

2. Механізм саморегулювання, за якого власники і топменеджери бізнесу зможуть прогнозувати і бачити реальний ефект від докладання додаткових зусиль на шляху підвищення своєї сталості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За ініціативи Уряду України протягом 2016 року тривав відкритий та інклюзивний процес адаптації цілей сталого розвитку (ЦСР). Було розроблено національну систему ЦСР (86 завдань розвитку та 172 показники для моніторингу їх виконання) [2]. Задля вирішення цих завдань активне залучення приватного бізнесу є вкрай необхідним. У табл. 1 наведено перелік завдань із залучення приватного бізнесу, які, за Національною доповіддю України 2017 року, було обрано пріоритетними [2].

Завдання у пріоритетних для України сферах ЦСР

Сфера та ЦСР	Національні завдання
Енергоефективність і чиста енергія, ЦСР 7	<ul style="list-style-type: none"> збільшити частку енергії, виробленої з відновлюваних джерел, у 3,5 рази; знизити енергоємність ВВП у два рази; зменшити технологічні витрати електричної енергії в розподільчих мережах в 1,3 рази; зменшити втрати тепла в тепломережах в 1,7 рази
Водопостачання та водовідведення, ЦСР 6, 15	<ul style="list-style-type: none"> забезпечити доступ до питної води гарантованої якості 100 % міського та сільського населення; скоротити обсяги скидів забруднених стічних вод у водні об'єкти майже втричі; скоротити частку скидів забруднених стічних вод у загальному обсязі скидів до морського середовища втричі
Транспортна інфраструктура, ЦСР 9	<ul style="list-style-type: none"> зменшити частку сільського населення, яке проживає на відстані понад 3 км від дороги з покриттям, у 10 разів; підвищити частку транспорту громадського користування у 3,3 рази та частку транспортної інфраструктури, що враховують потреби людей з інвалідністю, у чотири рази; підвищити частку доріг загального користування державного значення з твердим покриттям, що відповідають нормативним вимогам, у сім разів
Поводження з відходами, ЦСР 12	<ul style="list-style-type: none"> збільшити частку спалених та утилізованих відходів у загальному обсягу їх утворення майже у два рази
Туризм, ЦСР 11	<ul style="list-style-type: none"> збільшити кількість робочих місць у сфері туризму у два рази

У публікації [3] проаналізовано успішність виконання завдань у сфері енергоефективності та чистої енергії. Цей напрям відповідає ЦСР 7 «Доступна та чиста енергія». Розглянуто період звітності з 2015 по 2020 рік. Через пандемію коронавірусу та повномасштабну війну, яка почалась у 2022 році, національний огляд цілей сталого розвитку пізніше 2020 року в Україні не проводили.

Прогрес у досягненні ЦСР 7 контролювали за двома напрямками: модернізація енергетичної інфраструктури та підвищення енергоефективності. Із семи індикаторів за трьома було зафіксовано негативну динаміку, що свідчить про недосягнення цілей. За індикатором «Зменшення енергоємності ВВП...» зафіксовано досягнення позитивної

динаміки, але це відбулося за рахунок скорочення виробництва в енергоємних секторах економіки.

У джерелі [4] оцінено внесок бізнесу в досягнення Цілей сталого розвитку в період 2016-2019 років. Аналіз виконували, спираючись на звіти українських компаній. Попри те, що у звітах ЦСР 7 «Доступна та чиста енергія» згадано багато учасників, але частка тих, хто відніс цю сферу до пріоритетних, дорівнює 0 %.

Аналіз заявок на Конкурс КСВ-кейсів на відповідність національним завданням Цілей сталого розвитку показав, що за чотири роки проведення конкурсу частка компаній, які подали кейси за ЦСР 7, дорівнює 0 % [4].

Така статистика показує неготовність бізнесу впроваджувати суттєві зміни у сфері

енерговикористання своїх підприємств лише під впливом регуляторних процедур. Це складна та комплексна проблема. Серед головних чинників, необхідних для її вирішення, є можливість доступу до великої бази спеціалізованих знань щодо можливостей підвищення енергоефективності на виробництві. І важливим є те, щоб конкретна компанія могла отримати індивідуально підібраний комплекс заходів, який буде адаптований до поточного рівня енергетичної ефективності і доцільний за економічними/екологічними показниками.

Показник енергетичної ефективності суттєво впливає на собівартість виробництва продукції. Тому питанням підвищення енергоефективності зазвичай приділяють багато уваги на всіх рівнях організації та управління виробництвом. Існує багато робіт, що висвітлюють можливість вирішення такого завдання за рахунок удосконалення основного технологічного обладнання та засобів автоматизації, задіяних у виробничому процесі [5], застосування сучасних енергозберігаючих технологій [6, 7], упровадження нових ефективних організаційно-технічних заходів [8÷10].

Але рівень формалізації знань щодо спрямованого та впорядкованого пошуку рішень у цій сфері залишається низьким. Тому створення моделі повної множини способів підвищення енергоефективності виробничих систем є актуальним питанням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є створення моделі повної множини способів підвищення енергетичної ефективності виробничих систем як основи алгоритму роботи інструменту швидкої самооцінки та навігації у сфері енергоефективності для бізнесу.

Для досягнення сформульованої мети необхідно:

1. Розробити алгоритм виявлення структурної моделі множини способів підвищення енергоефективності виробничих систем.

2. Обґрунтувати доцільність формування такої множини в найбільш узагальненій формі з необхідністю подальшої конкретизації її структурних елементів.

3. Навести приклади заходів, які дають змогу реалізувати виявлені способи на прикладі роботи промислової котельні.

Основна частина дослідження. Через складність і невисокий рівень формалізації вирішення таких завдань пропонується створити алгоритм пошуку потенційних можливостей підвищення енергетичної ефективності на базі теоретичної моделі. Розроблена модель була отримана на основі системно-процесного підходу. Як відомо, системні дослідження мають теоретичну спрямованість і дають змогу вивчати об'єкти дещо абстраговано від процесів, що протікають у них, зосереджуючи увагу на встановленні взаємозв'язків між ними.

Тож на першому етапі було проведено узагальнену класифікацію основних елементів виробничих систем і джерел втрат енергетичних ресурсів на кожній із ділянок (рис. 1).

Будь-яке виробниче підприємство зазвичай має декілька типів енергоспоживчих систем. Вони можуть значно розрізнятися за типом споживаного енергетичного ресурсу, мати відмінності у способі транспортування до споживача, а також способом організації потрапляння на підприємство первісного потоку енергії. У разі відсутності власної генерації енергетичний ресурс закуповують у зовнішнього постачальника.

Задля належного оцінювання поточного рівня енергетичної ефективності кожного елемента слід мати спеціалізовані знання, яких часто не вистачає в інженерних працівників компаній. Залучення зовнішніх спеціалістів для представників малого та середнього бізнесу – це додаткове фінансове навантаження, що часто є стримуючим чинником. Тому одним із механізмів заохочення власників бізнесу до більш сміливих кроків з діяльності у сфері

енергоефективності є можливість проведення аудиту власними силами. Це можливо за наявності Програмних продуктів, які б давали змогу діагностувати

роботу конкретної системи та могли генерувати індивідуальні рекомендації щодо комплексу можливих заходів із підвищення результативності.

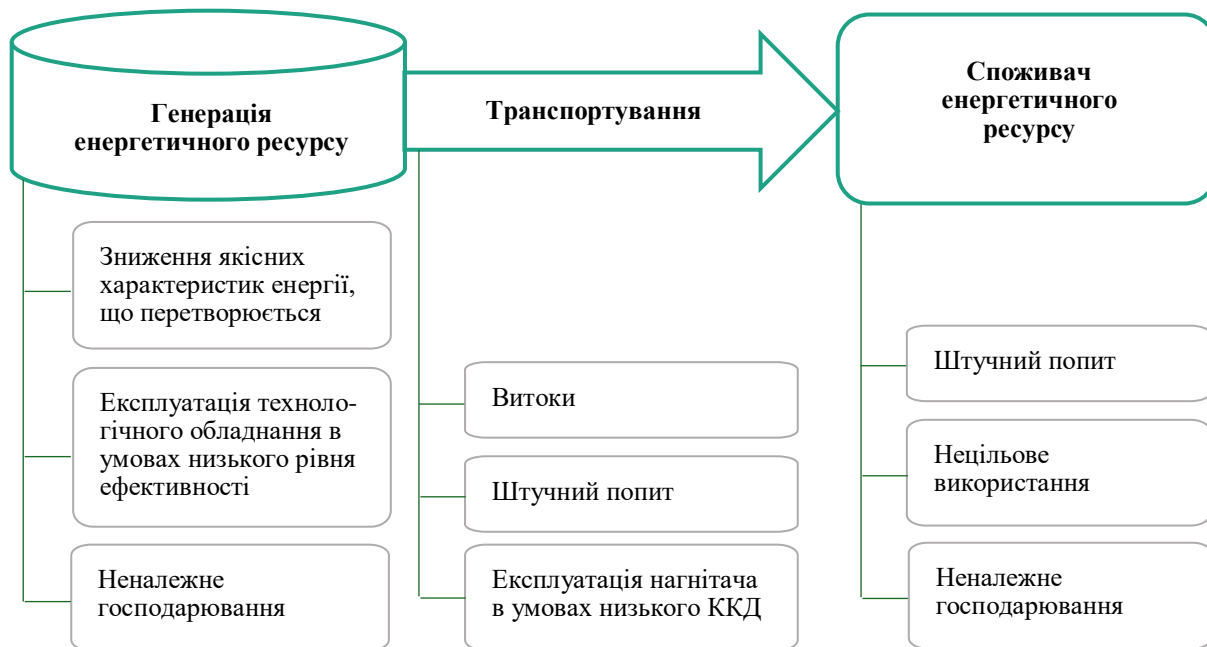


Рис. 1. Узагальнена класифікація джерел втрат енергетичних ресурсів на різних ділянках виробничої системи

Щоб задовольнити потребу малого і середнього бізнесу в саморегульованні діяльності в цій сфері, запропоновані Програмні продукти мають бути розроблені у вигляді зручного в користуванні інструменту. Цей інструмент має бути адаптований для аналізу окремої виробничої системи та мати такий комплекс функційних можливостей:

1. Швидка діагностика поточного рівня енергетичної ефективності системи.
2. Зручна система індикаторів ефективності та об'єктивна рейтингова шкала.
3. Генерування індивідуальних рекомендацій щодо можливостей більш ефективного використання енергії.

Для забезпечення генерації найбільш повного комплексу можливих рішень слід забезпечити наповнення баз даних інструменту, необхідно створити велику

базу з можливими заходами з підвищення ефективності на кожній ділянці відповідної системи. Така база має відповідати критерію максимально можливої повноти.

Для вирішення такого завдання розроблено модель повної множини способів підвищення енергетичної ефективності виробничих систем. Мета розроблення моделі – створити теоретичну основу для формування бази даних із повним обсягом можливих рішень щодо підвищення енергетичної ефективності.

Вихідною базою для визначення множини способів підвищення енергоефективності є множина об'єктів ($M_{об}$), до складу якої увійшли такі елементи виробничої системи:

- ділянка генерації енергетичного ресурсу (Γ_e); цей елемент системи може

знаходиться поза територією підприємства, тоді з аналізу виключають;

- ділянка транспортування енергетичного ресурсу (T_e);

- ділянка споживача (C_e).

Також доцільно систематизувати всі способи впливу на ефективність роботи кожної ділянки системи. Вони увійшли до складу множини прийомів ($M_{пр}$), які забезпечать перехід до низьковуглецевих та енергоефективних процесів на підприємстві:

- зменшення первісного обсягу споживання енергії ($Z_{по}$);

- виключення необґрунтованих втрат енергетичних ресурсів ($B_{вт}$).

Зазначені прийоми та згенеровані заходи на їхній основі застосовують для енергетичного ресурсу, який уже наявний. Але ЦСР 7, окрім підвищення енергоефективності, передбачає забезпечення переходу бізнесу на відновлювані та низьковуглецеві види енергії. З самодіагностикою щодо шляхів досягнення ЦСР 7 доцільно висвітлювати можливості такого переходу. Тому до множини прийомів додано третю групу – перехід до відновлюваних/низьковуглецевих джерел енергії ($P_{ве}$).

Класифікацію об'єктів і прийомів, на базі яких побудовано множину способів підвищення енергетичної ефективності виробничих систем, подано на рис. 2.



Рис. 2. Класифікація елементів моделі множини способів підвищення енергетичної ефективності виробничих систем

Використавши топологічні добутки елементів множини прийомів і множини об'єктів, можна отримати модель повної

множини способів підвищення енергетичної ефективності виробничих систем (у рамках прийнятої класифікації):

$$M_{сп}^i = M_{пр} \times M_{об} = \left\{ \begin{matrix} Z_{по} \times \Gamma_e, B_{вт} \times \Gamma_e, P_{ве} \times \Gamma_e, Z_{по} \times T_e, B_{вт} \times T_e, \\ P_{ве} \times T_e, Z_{по} \times C_e, B_{вт} \times C_e, P_{ве} \times C_e \end{matrix} \right\}, \quad (1)$$

де i – тип виробничої системи.

До найбільш поширених енергоспоживчих виробничих систем належать:

- опалення;
- вентиляційні системи;
- кондиціонування;
- стиснене повітря;
- насосні системи;
- парові системи,
- охолодження;
- освітлення.

Перелік включає лише типові системи, які відповідають за виконання додаткових забезпечувальних процесів на виробництві. Через свою широку затребуваність такі процеси наявні на багатьох підприємствах. Тому використання інструменту (програмного продукту) дасть змогу компаніям швидко здійснювати самодіагностику таких систем із залученням лише власних спеціалістів. Створювати в такий спосіб програму щодо аналізу ефективності роботи основного технологічного обладнання недоцільно.

Розроблена модель (1) включає дев'ять способів підвищення ефективності. Вони являють собою теоретичну основу для формування бази даних із найбільш повним переліком потенційних заходів, які забезпечать позитивні зміни. При цьому передбачено, що способи, виявлені за допомогою прийомів зменшення первісного обсягу ($Z_{по}$) і виключення необґрунтованих витрат ($V_{вт}$), будуть генеровані як індивідуальні рекомендації для компанії, спираючись на показники ефективності роботи конкретної системи. Запропонований підприємству комплекс заходів має відповідати умові економічної, екологічної та організаційної доцільності. Тому формування баз даних із максимально повним переліком пропозицій є важливою умовою результативності використання інструменту.

Приклади заходів, які можна використовувати для реалізації способів підвищення енергетичної ефективності виробничої системи опалення, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Приклади заходів для реалізації способів підвищення енергетичної ефективності системи опалення з власною газовою котельнею

Спосіб	Захід
1	2
$Z_{по} \times \Gamma_e$	Розроблення режимних карт роботи котлоагрегатів на різних навантаженнях. Проведення перерахунку сопел пальників під реальне навантаження. Налаштування автоматики котлоагрегатів. Обладнання котельні робочими приладами контролю та регулювання тощо
$V_{вт} \times \Gamma_e$	Модернізація системи хімводоочищення. Встановлення економайзера. Очищення поверхонь топки котла. Очищення поверхонь із боку води. Зменшення надлишку повітря. Регулярне обслуговування пальників. Відновлення теплоізоляції котлоагрегата. Усунення негерметичності обладнання, що спричиняють підсмоктування повітря в топку, тощо

1	2
$Z_{\text{по}} \times T_e$	Встановлення частотного привода на електродвигун насоса. Заміна насоса на більш енергоефективний. Усунення (скорочення) ділянки транспортування теплоносія тощо
$V_{\text{вт}} \times T_e$	Гідравлічне налаштування теплотраси. Модернізація трубопроводної запірно-регулювальної арматури. Усунення витоків теплоносія. Зменшення обсягу місцевих втрат тиску по всій довжині трубопроводу. Відновлення цілісності ізоляційного шару трубопроводів тощо
$Z_{\text{по}} \times C_e$	Встановлення термостатів в опалюваному приміщенні. Встановлення регуляторів температури на задану температуру. Налаштування витрат теплоносія відповідно до потреб і робочого часу тощо
$V_{\text{вт}} \times C_e$	Забезпечення рівномірного розподілу тепла по об'єктах споживання. Заміна радіаторів на більш енергоощадні. Очищення внутрішніх поверхонь радіаторів. Зменшення обсягів інфільтрації зовнішнього повітря в опалювані приміщення. Збільшення площі перенесення теплоти конвекцією тощо

Традиційна процедура проведення енергетичного аналізу виробничих процесів передбачає, що аудит насамперед починається з ділянки споживача енергетичного ресурсу. На другому етапі – ділянка транспортування, останньою аналізують ділянку генерації (за наявності). Алгоритм пошуку можливих рішень із використанням інструменту передбачає таку саму послідовність.

Створення баз даних із максимально повним переліком можливостей підвищення енергетичної ефективності дасть змогу систематизувати великий обсяг спеціалізованих знань із різних напрямів енергетичного господарства виробничих підприємств.

Використання інструменту швидкої самооцінки та навігації у сфері енергоефективності дасть змогу представникам малого та середнього бізнесу самостійно і більш впевнено робити кроки в

цьому напрямі. Інструмент дає своїм користувачам такі функційні переваги:

1. Генерує індивідуальні рекомендації про можливості більш ефективного використання енергії.
2. Спрощує доступ до спеціалізованих знань у сфері енергоефективності різних об'єктів виробничих систем.
3. Допомагає компаніям у досягненні Цілі сталого розвитку 7 «Доступна та чиста енергія» за рахунок покращення екологічної та економічної складової.

Висновки. 1. Для представників малого та середнього бізнесу необхідно створювати механізми, які спростять перехід до сталої моделі функціонування.

2. Пропоновано залучення спеціалізованих програмних продуктів, які дадуть змогу самостійно оцінювати і орієнтуватися в можливостях енергоефективності.

3. Модель повної множини способів підвищення енергоефективності виробничих систем отримана з використанням системно-процесного підходу і включає дев'ять загальних структур способів підвищення ефективності.

4. Застосування розробленої моделі у програмних продуктах дає змогу проводити формалізований спрямований пошук способів підвищення енергетичної ефективності з повного обсягу можливих рішень (у рамках прийнятої класифікації).

Список використаних джерел

1. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015 – A/RES/70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf.
2. Національна доповідь «Цілі сталого розвитку: Україна» (2017). URL: <https://ukraine.un.org/uk/49413-2017-національна-доповідь-«цілі-сталого-розвитку-україна»>.
3. Добровільний національний огляд щодо цілей сталого розвитку в Україні (2020). URL: <https://ukraine.un.org/uk/151096-добровільний-національний-огляд-щодо-цілей-сталого-розвитку-в-україні>.
4. Внесок українського бізнесу в реалізацію Україною Цілей сталого розвитку 2016-2020 рр. URL: <https://csr-ukraine.org/wp-content/uploads/2020/12/Vpliv-biznesu-na-CSR.pdf>.
5. Запашук Л. В. Енергозбереження як напрям підвищення ефективності виробничої діяльності /Мукачівський державний університет. 2017. № 7. С. 428-434.
6. Мелконова І. В., Мелконов Г. Л. Підвищення енергоефективності промислових підприємств. *Інноваційні технології для промисловості*. 2023. № 1 (1). URL: <https://doi.org/10.33216/ITP-2022-1-1-1>.
7. Афанасьєв М. В., Салашенко Т. І. Стратегія підвищення енергоефективності промисловості регіону: теоретико-методичні аспекти формування: монографія. Харків: ХНЕУ, 2014. 284 с.
8. Гаприндашвілі Б. В. Енергозбереження як чинник підвищення конкурентоспроможності промислових підприємств. *Бізнес-Інформ*. 2014. № 8. С. 213–217.
9. Vorfolomeiev A. Implementation of resource efficient and cleaner production options at Ukrainian enterprises. *Acta Innovations*. 2019. № 30. P. 68-75.
10. Біловол Г. В. Моделювання множини загальних структур способів підвищення енергоефективності виробничих систем. *Прогресивні технології і системи машинобудування: зб. наукових праць*. Донецьк: ДонНТУ, 2014. № 1. С. 21-28.

Біловол Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0001-6168-5216. E-mail: hanna.bilovol@gmail.com.

Каграманян Артур Олександрович, кандидат технічних наук, проректор із науково-педагогічної роботи, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3520-4911.

E-mail: kartal2@ukr.net.

Василенко Олег Вадимович, кандидат технічних наук, в. о. завідувача кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-6770-0955. E-mail: 0673966747@ukr.net.

Онищенко Андрій Володимирович, асистент кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1217-5724. E-mail: onyshchenko@kart.edu.ua.

Bilovol Hanna, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management of the Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0000-0001-6168-5216.

Email: hanna.bilovol@gmail.com.

Kagramanian Artur, Vice-Rector for Research and Education of the Ukrainian state university of railway transport.

ORCID iD: 0000-0003-3520-4911. E-mail: kartal2@ukr.net.

Vasylenko Oleh, Acting Head of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management of the Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0000-0002-6770-0955. E-mail: 0673966747@ukr.net.

Onishchenko Andrii, Assistant of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management of the Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0000-0003-1217-5724. E-mail: onyshchenko@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 13.12.2024 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.01:691.322

ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ КРУПНОГО ЗАПОВНЮВАЧА, ОТРИМАНОВОГО З ПОДРІБНЕНИХ БЕТОННИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ШПАЛ

Асп. О. С. Зінченко

QUALITY ASSESSMENT OF THE COARSE AND FINE AGGREGATES FROM GRINDED CONCRETE RAILWAY SLEEPERS

Postgrad. student O. Zinchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320709>

***Анотація.** У статті наведено результати оцінювання якості вторинних заповнювачів, отриманих із подрібнених залізобетонних шпал, за гранулометричним складом, лежачістю і стиранням. Проведено порівняння результатів визначення за стандартними методами і запропонованим методом обробки зображень. Установлено, що останній дає більш точні і швидкі результати. Уточнено середній розмір частинок щебеню переважальної фракції, ступінь окатаності, час стирання. Використання перероблених заповнювачів зменшить потребу будівельної галузі в природних ресурсах, знизить вартість виробництва бетонних конструкцій і скоротить площу земель, зайнятих будівельним сміттям.*

***Ключові слова:** крупний заповнювач, гранулометричний склад, лежачість, стирання.*

***Abstract.** The increasing urgency of reusing debris from demolished concrete structures is a global issue, not just confined to Ukraine. Current strategies for resource reuse involve crushing concrete waste into recycled aggregate to replace natural aggregate, or into recycled powder to substitute for cement in mortar and concrete. Utilizing construction waste as secondary materials helps reduce the demand for natural resources, decrease carbon footprint, and clears areas of accumulated remains. The aim of the work is to evaluate the quality of aggregates obtained from crushed concrete of railway sleepers. To achieve the goal, the following tasks were set: to determine the particle sizes of aggregate fractions by the standard and accelerated methods; to determine the content of plate-shaped (flake) and needle-shaped grains by the standard method and the accelerated method; to determine the abrasion time of crushed stone; to compare the obtained data with the standard requirements for concrete aggregates; to give recommendations on the application of the accelerated method for assessing the properties of coarse aggregate. The most representative fraction of coarse aggregate based on the results of sieving is the fraction with an average particle size of 30 mm, while a more accurate image processing method yields an average size of 22.6 mm. Such a discrepancy will lead to errors in calculating concrete compositions and excess cement consumption or obtaining concrete of lower strength. Based on the content of plate-shaped (flake) and needle-shaped grains, determined by the standard method over several hours of measurements, secondary crushed stone belongs to the cubic group of concrete aggregates. An assessment by the image processing method over several minutes yields a circularity of 0.78, which characterizes a greater degree of grain circularity after mechanical processing. The highest percentage of old cement-sand mortar removal occurs in the first 1-1.5 hours, which will form the basis for developing*

a technology for using aggregates from concrete residues. Subsequent studies will be aimed at establishing the quality of sand using the proposed methods for developing express methods for assessing the quality of coarse and fine aggregates, which will allow determining their properties directly at construction sites.

Keywords: coarse aggregate, granulometric composition, flaky, abrasion.

Вступ. Визначення якості кондиційних природних заповнювачів для виробництва бетону – піску і щебеню – регламентовано відповідними нормативними документами [1, 2]. Також передбачено застосування крупних і дрібних заповнювачів із відходів промисловості [3, 4]. У цьому випадку щебінь і пісок походять із гірських порід, що попутно видобувають, та відходів збагачення гірничозбагачувальних підприємств вугільної, металургійної та інших галузей промисловості, із металургійних, паливних та інших шлаків. Додатково дрібний заповнювач може бути виготовлений із золошлакової суміші теплових електростанцій або грубодисперсної золи виносу. На сьогодні в Україні все більше зростає кількість зруйнованих у результаті воєнних дій бетонних конструкцій, які потребують значних площ для їх накопичення і зберігання. Тому актуальною стає проблема їхньої повної переробки для повторного використання з метою відновлення житлового фонду і зруйнованих об'єктів інфраструктури. Оцінювання якості рециклінгових заповнювачів слід здійснювати відповідно до стандартних методів, але особливості походження рециркульованих піску і щебеню потребують пошуку нових більш сучасних і швидких способів встановлення відповідності чинним стандартам. Мета статті – вдосконалення сучасних методів визначення деяких характеристик заповнювачів, зокрема їхнього гранулометричного складу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-75 [2] крупний заповнювач для виготовлення бетону оцінюють за

зерновим складом, формою зерен, міцністю, стиранням, вмістом зерен слабких порід, морозостійкістю, вмістом пилоподібних і глинистих частинок, у тому числі глини в грудках, вмістом шкідливих домішок і сполук, радіаційними властивостями і стабільністю фізико-механічних властивостей. Оцінюють якість дрібного заповнювача відповідно до ДСТУ Б В.27-32 [1] за зерновим складом, вмістом пилоподібних і глинистих частинок, у тому числі глини у грудках, вмістом органічних домішок, міцністю (для подрібнених пісків), значенням сумарної питомої активності природних радіонуклідів. Для розрахунку складу бетону найбільше значення мають зерновий склад і форма обох видів заповнювачів. Зерновий склад визначають розсіюванням проби на стандартному наборі сит, а вміст зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми і стирання в поличному барабані встановлюється за ДСТУ Б В.2.7-71 [5]. У розрахунках складів бетону або цементно-піщаного розчину розмір зерен буде впливати на витрати цементу, а форма зерен – на водопотребу і рухливість сумішей. Недоліком стандартного методу визначення зернового складу є неможливість точного встановлення розмірів зерен заповнювачів переважальної фракції, що впливає на точність розрахунку складу бетону і призводить до перевитрат цементу. Визначення форми зерен за стандартним способом є дуже часовитратним і призводить до помилок, що впливає на кількість води для приготування сумішей. Тому деякі дослідники пропонують інші методи визначення розмірів і форми частинок піску і щебеню.

Вторинні заповнювачі бетону складаються з натуральних заповнювачів і

залишків розчину, що прилипли до їхньої поверхні. Кількість, розмір і морфологія прилиплої залишки пасти впливають на якісні аспекти рециклінгових заповнювачів, такі як їхній потенціал зчеплення з новою цементною матрицею в бетоні, а також загальні реологічні та експлуатаційні характеристики бетону. Наприклад, метою дослідження [6] було вивчення впливу зменшення прилиплої затверділої розчину за допомогою методу механічної обробки на характеристики бетону, що містить рециркульований щебінь в різних відсоткових кількостях. Оброблення відбувалося всередині барабана автобетонозмішувача через певні проміжки часу, ефект якого визначено за допомогою аналізу зображень, запису втрат маси та визначення округлості. Було зроблено висновок, що оптимальна тривалість обробки, за якої не відбувається подальше значне видалення прилиплої пасти, становить 3 год, а бетонні суміші, що містять такий вторинний щебінь, демонструють експлуатаційні характеристики, які можна порівняти з характеристиками еталонної бетонної суміші. Що стосується впливу на рухливість бетонних та розчинових сумішей, то традиційні реологічні уявлення переважно розроблено на основі припущень про сферичний заповнювач, тоді як форма частинок – не ідеальне коло, а істотно впливає на реологічні властивості бетону. Тому в дослідженні [7] реологічні властивості бетону зі штучним піском прогнозовані відносно форми частинок заповнювача на основі багаторівневого двофазного припущення. На основі запропонованих моделей вплив форми частинок дрібного та крупного заповнювача на реологічні властивості сумішей може бути пояснений їхнім впливом на відносну товщину плівки цементної пасти і відносну товщину плівки цементно-піщаного розчину відповідно. Запропоноване багаторівневе прогнозування закладає основу для пропорції суміші бетону з

некондиційним заповнювачем відповідно до зазначених реологічних вимог. У цих двох роботах процес визначення округлості форми C складався з початкового обчислення площі та периметра кожної частинки за допомогою програмного забезпечення, а потім із застосуванням рівняння

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2}, \quad (1)$$

де A – площа частинки заповнювача, мм²;

P – периметр частинки заповнювача, мм.

Значення округлості можуть коливатися в межах від 0,0 до 1,0, де 1,0 відповідає ідеальному колу. Коли значення наближається до 0,0, це вказує на все більш витягнуту форму. Наприклад, у роботі [6] значення округлості становило 0,66 до механічної обробки в барабанному млині і 0,79 після. Як бачимо, у результаті стирання в барабані форма частинок стала більш округлою на 13 %.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є оцінювання якості заповнювачів, отриманих із подрібненого бетону залізничних залізобетонних шпал. Для досягнення мети було поставлено такі завдання: визначити розміри частинок фракцій заповнювачів стандартним і прискореним методом, вміст зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми стандартним методом і прискореним, час стирання щебеню; порівняти отримані дані зі стандартними вимогами до заповнювачів бетону; надати рекомендації щодо застосування прискореного методу оцінювання властивостей крупного заповнювача.

Матеріали і методи дослідження. Матеріал для досліджень отримували шляхом подрібнення залишків залізобетонних залізничних шпал у щоківній дробарці і барабанному млині з наступним

вивантажуванням на стандартний набір сит для розділення заповнювачів на фракції. Гранулометричний склад і криву розподілу за розмірами частинок визначали за частковими залишками на ситах після просіювання суміші крупного та дрібного заповнювачів згідно з ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [8]. Форму зерен щебеню зернового складу крупного заповнювача, тобто вміст зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми, встановлювали шляхом вимірювання сторін кожної щебенини і визначали кількість зерен, товщина яких втричі і більше менша за довжину відповідно до ДСТУ Б В.2.7-71 [5]. Стирання (знос) щебеню визначали за втратою маси зерен при обертанні проби в барабані з металевими кулями згідно з ДСТУ Б В.2.7-71 [5]. Підготовлену пробу завантажували в поличковий барабан разом із сталевими кулями і приводили його в обертання зі швидкістю 33 об/хв. Після закінчення випробування вміст барабана просіювали через сито з отворами діаметром 5 мм і контрольне сито з сіткою № 1,25. Залишки на ситах з'єднували і зважували.

Для прискореного визначення розмірів зерен щебеню в роботі застосовано нестандартний метод, сутність якого

полягає в такому. За допомогою фотокамери отримували цифрові зображення заповнювачів і обробляли за допомогою програмного забезпечення ImageJ, яке є у вільному доступі для використання. Після певних перетворень зображень програма визначає площу кожної частинки, її периметр і округлість за формулою (1). На основі відомої площі проводили розрахунок еквівалентного діаметра кожної частинки, визначали інтервали діаметрів і кількість частинок, які потрапляють у ці інтервали, і будували за результатами криву розподілу частинок за розмірами.

Основна частина досліджень.
Визначення розмірів частинок фракцій заповнювачів стандартним методом. Для побудови кривої розподілу за розмірами частинок було визначено часткові залишки на ситах після просіювання суміші крупного та дрібного заповнювачів. Середній розмір частинок кожної фракції розраховували як середнє арифметичне значення розмірів отворів сітки двох сусідніх сит. Часткові залишки на ситах наведено в таблиці, а діаграму розподілу частинок за розмірами – на рис. 1.

Таблиця

Залишки частинок на ситах суміші заповнювачів

Розміри отворів контрольних сит, мм	Середній розмір частинок фракції, мм	Часткові залишки на ситах, %
пройшло через сито 0,16	0,08	28,37
0,16	0,24	11,15
0,315	0,47	1,78
0,63	0,94	0,32
1,25	1,88	0,76
2,5	3,35	1,42
5	7,5	5,50
10	15	18,97
20	30	31,72
40		0

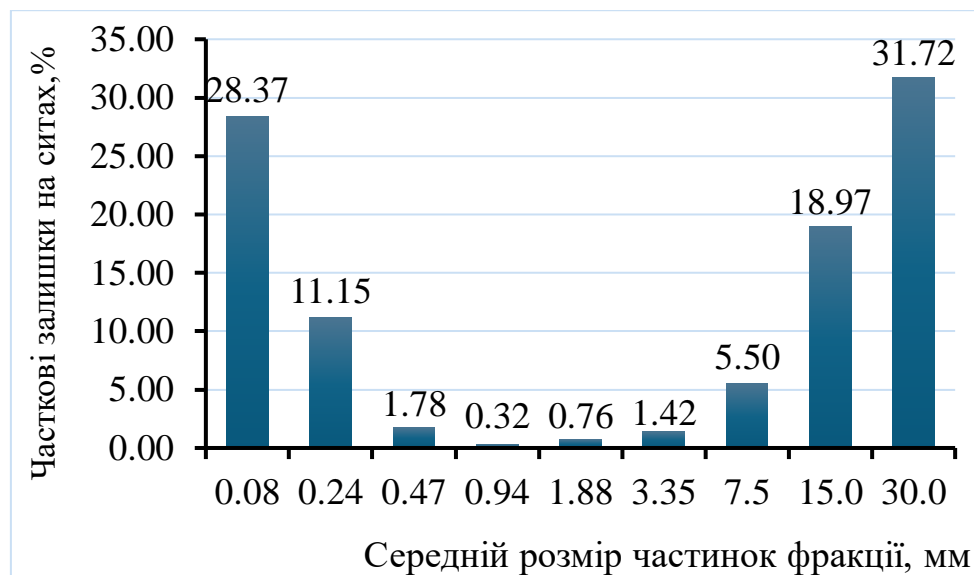


Рис. 1. Діаграма розподілу частинок суміші заповнювачів за розмірами

Як видно з рис. 1, переважальними є дві фракції із середніми розмірами 0,08 і 30 мм.

Визначення вмісту зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми стандартним методом. Співвідношення розмірів зерен щебеню визначали за допомогою штангенциркуля. Для порівняння результатів оцінювали два види крупного заповнювача – природний і рециркульований щебінь. Із кожного виду заповнювача було відібрано пробу масою 1 кг, виміряно всі сторони кожного зерна щебеню і визначено у відсотках кількість частинок, для яких один розмір втричі і більше перевищує розмір інших сторін зернини. У результаті дослідження встановлено, що відсоток зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми для натурального щебеню становить 16,7 %, вторинного після подрібнення в барабанному млині – 14,6 %. За ДСТУ Б В.2.7-74 [4], природний щебінь належить до покращеної групи за формою зерен (нормований відсоток від 15 до 25 %), а рециркульований щебінь – кубоподібної групи (нормований відсоток від 10 до 15 %).

Визначення стирання (зносу) щебеню. Вторинний щебінь із подрібнених залізничних шпал містить багато старого цементно-піщаного розчину, який потрібно

видалити для покращення адгезії нового розчину під час виготовлення нового бетону на рециркульованих заповнювачах. Час механічної обробки може коливатися від двох до п'яти годин. Для пришвидшення зняття залишків різними авторами рекомендовані попередній нагрів [9], обробка кислотою [10], ультразвукові хвилі [11] або їх комбінація. Для визначення часу, необхідного для видалення залишків цементно-піщаного розчину, пробу масою 2 кг завантажували в барабанний млин і кожні 30 хв (що відповідає 1500 обертам млина) вивантажували на сито розміром 20 мм і визначали масу залишку на ситі. Під час обертів у млині металеві кулі і перекошування частинок сприяли очищенню поверхні щебеню, і початкова маса проби зменшувалася, що показано на рис. 2. Для покращення стирання налиплимого розчину в дослідженні застосовували кулі різного діаметра, як було показано в попередньому дослідженні [12].

Як бачимо, найбільше очищення (найбільші втрати маси) відбувається в перші одну-дві години, за чотири години втрати маси становлять майже 50 %, а тривалість обробки понад п'ять годин неефективна, оскільки майже нема втрат маси.

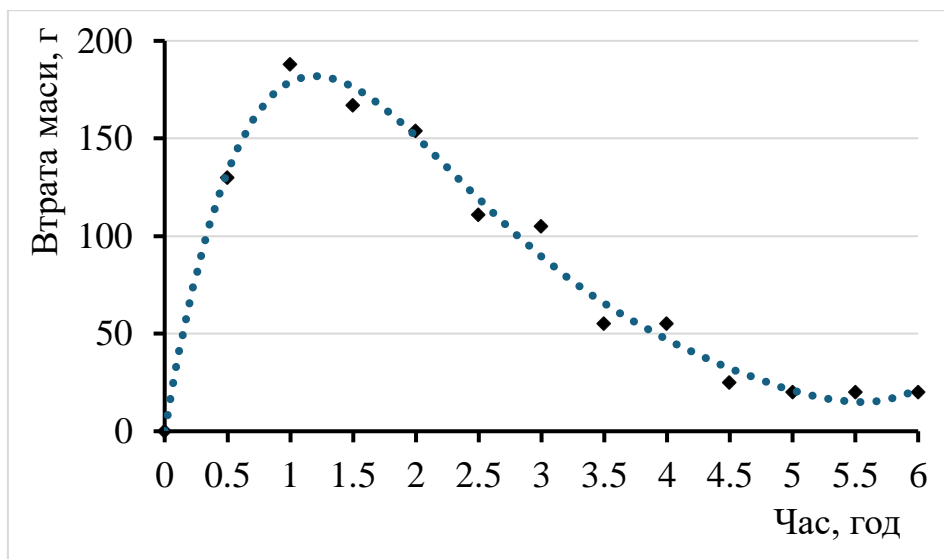


Рис. 2. Втрати маси крупного заповнювача залежно від часу обробки

Визначення форми і розмірів частинок фракцій заповнювачів методом обробки зображень. Як зазначено вище, метод визначення середнього розміру частинок фракцій заповнювачів за середнім арифметичним значенням розмірів отворів сусідніх сит є неточним. Більш точні результати дає безпосереднє вимірювання розмірів кожної частинки щебеню штангенциркулем або розмірів частинок

піску седиментаційним аналізом. Недоліком цих методів є великі витрати часу на вимірювання і обробку результатів. У роботі розміри частинок визначали способом обробки фотографій рециркульованих заповнювачів після механічного очищення від залишків цементно-піщаного розчину в барабанному млині, результати етапів якого наведено на рис. 3.

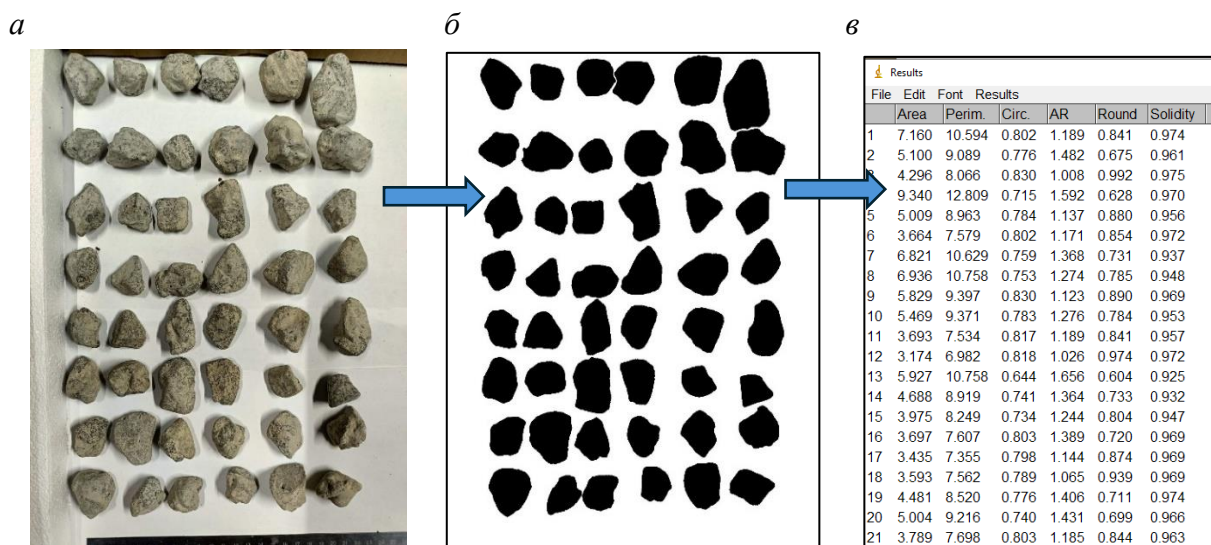


Рис. 3. Обробка зображень програмою ImageJ:

a – перший етап (отримання фотографії заповнювачів); *б* – другий етап (обробка фотографії програмою); *в* – третій етап (розрахунок параметрів)

На третьому етапі отримують результати розрахунків як таблицю, де в першому стовпчику наведено номер частинки, у другому і третьому – її площу і периметр, четвертому – округлість частинки, розраховану за формулою (1). У такий спосіб було оброблено фотографії природних заповнювачів. Результати свідчать, що середнє значення показника округлості вторинних заповнювачів становить 0,78, у той час як для натурального заповнювача цей показник дорівнює 0,73, що означає менший ступінь окатаності зерен. Слід зазначити, що різниця показників становить 5 %, а згідно зі стандартним методом відсоток зерен пластинчастої та голчастої форм (показник, протилежний округлості) відрізняється на

2,1 %. Оскільки для ідеально квадратного перерізу показник округлості дорівнює 0,78, отже, попередньо можна визначити це число як межу значення округлості, яке означає перехід від покращеної групи за формою зерен до кубоподібної.

Отримані дані також дають змогу розрахувати еквівалентний діаметр частинок за величиною їхньої площі (стовпчик 2 таблиці на рис. 3) і побудувати діаграму розподілу частинок за розмірами. Ці результати наведені на рис. 4. Як бачимо, середній розмір переважальної фракції природного щебеню становить 25,6 мм, а рециркульованого – 22,6 мм. Ці величини значно відрізняються від визначених за середнім розміром сит для розсіювання 15 і 30 мм (рис. 1).

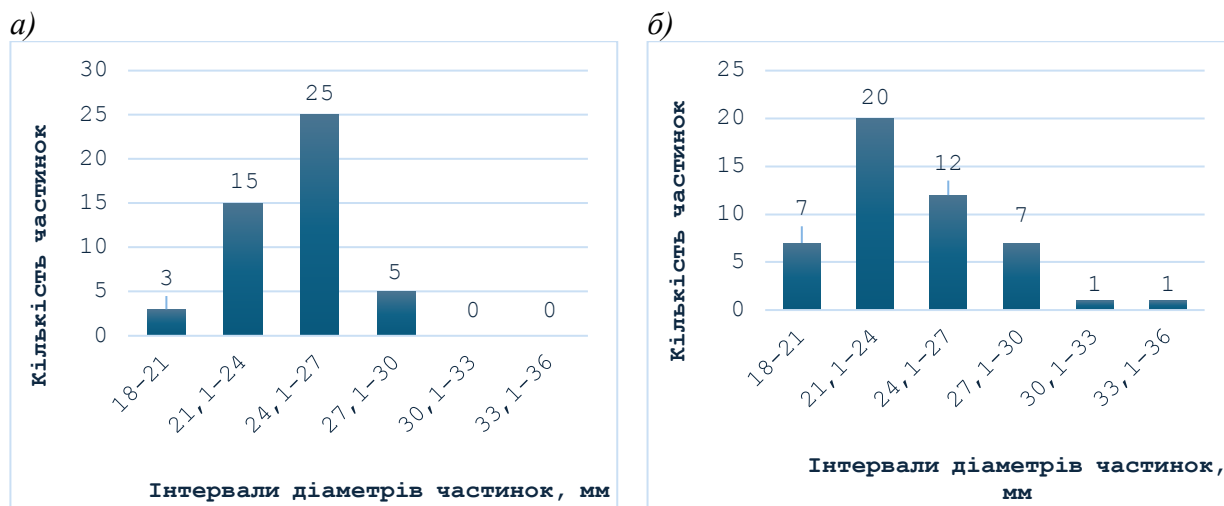


Рис. 4. Діаграми розподілу частинок за розмірами природного (а) і рециклінгового (б) щебеню

Відмінність у цих величинах призведе до помилкового розрахунку складів бетону, а саме визначення об'єму цементно-піщаного розчину, який має заповнити міжзерновий простір між частинками щебеню. Якщо справжній розмір частинок буде більше прийнятого за результатом розсіву, то міжзерновий простір буде менше, що призведе до більшого, ніж потрібно, об'єму цементно-піщаного

розчину і, як наслідок, перевитрат цементу. У протилежному випадку менший, ніж вважають, розмір частинок щебеню призведе до збільшення міжзернового простору, який не буде повністю заповнений розрахованою кількістю цементно-піщаного розчину, що викличе збільшення пористості, а отже зменшення міцності і довговічності бетону.

Висновки. У результаті оцінювання якості заповнювачів, отриманих від подрібнених залізобетонних шпал, встановлено таке. Переважальна фракція крупного заповнювача за результатами розсіву на ситах є фракцією з середнім розміром частинок 30 мм, у той час як більш точний метод обробки зображень дає величину середнього розміру 22,6 мм. Така розбіжність призведе до помилок у розрахунках складів бетону і перевитрат цементу або отримання бетону меншої міцності. За вмістом зерен пластинчастої (лещадної) і голчастої форми, визначеним стандартним методом протягом кількогодинних вимірювань, вторинний щебінь належить до кубоподібної групи

заповнювачів для бетону. Оцінювання методом обробки зображень протягом кількох хвилин дає величину округлості 0,78, що характеризує більший ступінь окатаності зерен після механічної обробки. Найбільший відсоток видалення старого цементно-піщаного розчину відбувається за перші 1-1,5 год, що буде покладено в основу розроблення технології використання заповнювачів від залишків бетону. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення якості піску запропонованими методами для розроблення експрес-методів оцінювання якості крупного і дрібного заповнювачів, які дають змогу визначать їхні властивості безпосередньо на будівельних майданчиках.

Список використаних джерел

1. ДСТУ Б В.27-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 35 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ: Держбуд України, 1999. 14 с.
3. ДСТУ Б В.2.7-29-95 Будівельні матеріали. Дрібні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 35 с.
4. ДСТУ Б В.2.7-74-98 Будівельні матеріали. Крупні заповнювачі природні, з відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. Київ: Держбуд України, 1999. 16 с.
5. ДСТУ Б В.2.7-71-98 Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. Київ: Держбуд України, 1999. 47 с.
6. Savva P., Ioannou S., Oikonomopoulou K., Nicolaidis D., Petrou M.F. A Mechanical Treatment Method for Recycled Aggregates and Its Effect on Recycled Aggregate-Based Concrete. *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 1-18. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14092186>.
7. Ren Q., Tao Y., Jiao D., De Schutter G., Jiang Z. Rheological properties of concrete with manufactured sand: A multi-level prediction. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 133. P. 104647. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104647>.
8. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 86 с.
9. Bhasya V., Bharatkumar B. H. Mechanical and Durability Properties of Concrete Produced with Treated Recycled Concrete Aggregate. *Materials Journal*. 2018. Vol. 115. Is. 2. P. 209-217. URL: <https://doi.org/10.14359/51701239>.

10. Wang B., Yan L., Fu Q., Kasal B. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Resources, Conservation & Recycling*. 2021. Vol. 171.105565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>.

11. Liu K., Xu W., Sun D., Tang J., Wang A., Chen D. Carbonation of recycled aggregate and its effect on properties of recycled aggregate concrete: A review. *Material Express*. 2021. Vol. 11. P. 1439–1452. URL: <https://doi.org/10.1166/mex.2021.2045>.

12. Спосіб виготовлення заповнювачів для бетону із відходів залізобетонних шпал: пат. на корисну модель UA 156792. № u202305944; заявл. 08.12.2023; опубл. 07.08.2024; Бюл. № 32. 7 с.

Зінченко Олексій Сергійович, здобувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-68. E-mail: potatosrumba@gmail.com.
ORCID 0009-0000-3858-8258.

Zinchenko Oleksii, postgraduate student, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-68. E-mail: potatosrumba@gmail.com.
ORCID 0009-0000-3858-8258.

Статтю прийнято 01.11.2024 р.

УДК 696.41

ПОРІВНЯННЯ ФАКТИЧНОГО ТА НОРМОВАНОГО СПОЖИВАННЯ ГАРЯЧОЇ ВОДИ ЖИТЛОВИМ ФОНДОМ УКРАЇНИ

Д-р техн. наук О. М. Тарадай, канд. техн. наук О. В. Гвоздецький,
асп. С. В. Дяченко, магістр К. А. Гончаров

COMPARISON OF ACTUAL AND STANDARDIZED CONSUMPTION OF HOT WATER BY THE HOUSING STOCK OF UKRAINE

Dr. Sc. (Tech.) O. M. Taradai, PhD (Tech.) O. V. Gvozdeckii,
postgraduate student S. V. Diachenko, master's K. A. Goncharov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320710>

Анотація. Дослідження сфокусовано на проведенні аналізу нормованих і фактичних витрат гарячої води багатоквартирних житлових будинків, розташованих у різних містах України. Наведено статистичні дані про витрати гарячої води на потреби житлових будинків і квартир. У результаті дослідження встановлено, що економія споживання гарячої води, порівнюючи фактичні та нормовані витрати, для квартири з чотирма мешканцями за період червень – грудень 2021 року склала 42,2 м³.

Ключові слова: водопостачання, гаряча вода, споживач, витрати води, теплова енергія.

Abstract. This study analyzes the consumption of hot water in multi-apartment residential buildings located in different cities of Ukraine. Data on standardized and actual hot water

consumption for residential buildings and apartments were collected and analyzed. The main objective of the study was to investigate and compare the standardized and actual consumption of hot water and heat energy in multi-story residential buildings. To accomplish this task, data from apartment water meters on hot water consumption for residential buildings and apartments were collected. After processing the collected information, the necessary calculations were made to determine the savings with the subsequent consumption of hot water of actual and standardized consumption for an apartment with four residents. This allowed us to establish the actual consumption of heat and hot water and determine the efficiency of hot water supply systems. Previously, due to the lack of individual meters, the total standardized and actual consumption of cold and hot water per person was compared by calculation.

Today, the design of hot water systems is still based on outdated standards adopted in the 1990s. As a result, the current standards are overestimated and require immediate objective review and recalculation. Approximate readings of apartment meters should be used, not the average values that have been used for decades. The prices per 1 m³ of hot water per resident for apartments without heated towel rails were taken into account when building the graphs. As of 2021, the cost was UAH 86.32. As a result of the calculations, it was found that the savings in hot water consumption, compared to actual and standardized consumption, for the apartment in question with four residents for the period June – December 2021 is 42.2 m³, and in value terms, this amounts to UAH 3642.70.

Keywords: water supply, hot water, consumer, water consumption, heat energy.

Вступ. Населення завжди намагалося забезпечити себе гарячою водою, тому системи централізованого гарячого водопостачання давно стали однією з основних складових комфортних умов життя цивілізованих країн світу, зокрема й України.

Гаряче водопостачання – це господарська діяльність, спрямована на задоволення потреб споживачів у гарячій воді належної якості, необхідної кількості та відповідної температури, що подають до приміщення споживача. Сучасний житловий будинок або промислове виробництво неможливо уявити без постійного подавання гарячої води.

За ДБН [1], розрахункові (питомі середні за рік) добові витрати води в житлових будинках, л/доба, на одного мешканця залежать від кліматичного району (рис. 1) і комфортності житлового будинку, тому гаряча вода потрібна в будь-якій кліматичній зоні і на будь-якому виробництві цілорічно. Потреба в гарячій воді пов'язана не тільки з побутовими потребами, а і санітарно-епідеміологічними

вимогами, які диктують високі стандарти гігієни.

Фактично кількість спожитої гарячої води залежить від її якості, тобто температури. Чим вище температура гарячої води, тим меншими будуть її витрати, а кількість спожитої теплової енергії для приготування гарячої води буде однаковою.

Але останнім часом спостерігається значне скорочення споживання гарячої води, спровоковане постійними змінами власників тепlopостачальних організацій, зростанням цін на енергоресурси й матеріали, а також іншими факторами, які призвели до того, що багато споживачів відмовилися від централізованого гарячого водопостачання і перейшли на децентралізовані поквартирні джерела гарячої води.

Тому приготування та підтримання постійного споживання абонентами гарячої води з необхідними параметрами давно стало одним із першочергових завдань тепlopостачальних організацій і домовласників, а дослідження питань із метою збирання статичних даних у системах

гарячого водоспоживання є актуальними на сьогодні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень [2-8] свідчить, що над пошуком вирішення проблеми нормування витрат гарячої води у квартирах і багатоповерхових житлових будинках працюють не лише науковці, а і фахівці з водопостачання.

У минулому, через відсутність лічильників у квартирах, відбувалося фактичне порівняння загальних показників нормативних та фактичних витрат холодної та гарячої води, віднесених на одну людину, розрахунковим шляхом. Для проектування систем гарячого водопостачання досі застосовують норми 90-х років минулого століття.

Як результат, сьогоднішні чинні норми значно завищені й потребують негайного об'єктивного перегляду в бік зменшення. Базою для нормування мають стати не усереднені розрахункові показники, що діють уже багато десятиліть, а апроксимовані показники наявних квартирних лічильників.

Завдяки масовому встановленню квартирних лічильників ми маємо можливість отримувати більш точні дані про споживання води.

Переглянути потрібно і сформовану практику розподілу та співвідношення витрат і втрат гарячої води.

Перегляд нормативів особливо важливий для правильного розрахунку потреби у воді та теплі під час розроблення схем тепловодопостачання.

Важливість перегляду нормативів обумовлена визначенням потреби в теплі для гарячого водопостачання. Якщо брати за основу чинні на сьогодні норми, то кількість тепла, розрахованого за ними, вдвічі перевищуватиме фактичну.

Результат такої «неточності» для схем тепловодопостачання міст – це зайві десятки сотні мільйонів гривень, закладені в діаметри труб, потужності котлів, металоконструкції, теплоізоляцію тощо.

Визначення мети та завдання дослідження. Основна мета публікації – на прикладі багатоповерхових житлових будинків, розташованих у різних містах України, розглянути, порівняти і проаналізувати нормовані та фактичні витрати гарячої води й теплової енергії системами гарячого водопостачання.

Для виконання цього завдання необхідно зібрати показання квартирних лічильників води з витрат гарячої води на потреби житлових будинків і квартир. Після обробки зібраної інформації провести необхідні розрахунки для визначення фактичної економії споживання гарячої води, порівнюючи фактичні та нормовані витрати для квартири з чотирма мешканцями.

Основна частина дослідження. Для порівняння розрахункових і нормованих витрат гарячої води (табл. 1) і витраченої теплової енергії для приготування гарячої води за однакових температур гарячої і холодної води ($t_h = 60^\circ$; $t_c = 5^\circ\text{C}$; $t_c^s = 15^\circ\text{C}$) були вибрані багатоповерхові житлові будинки міст Київ, Одеса, Харків, Хмельницький із централізованим гарячим водопостачанням і ваннами завдовжки більш ніж 1500 мм. Кількість квартир – 144, кількість мешканців – 504 особи.

Для аналізу були використані виключно показання квартирних лічильників води, отримані офіційно згідно з показаннями приладів комерційного обліку теплопостачальних і водопостачальних організацій і відповідного нарахування споживачам.

У статті розглянуто міста, які належать до одного кліматичного районування території України (рис. 1) і, отже, мають одну норму витрат гарячої води для однакових умов комфортності житлового будинку, але за рахунок періоду опалювального сезону ми отримуємо різну нормовану кількість необхідної теплової енергії на приготування гарячої води протягом року.

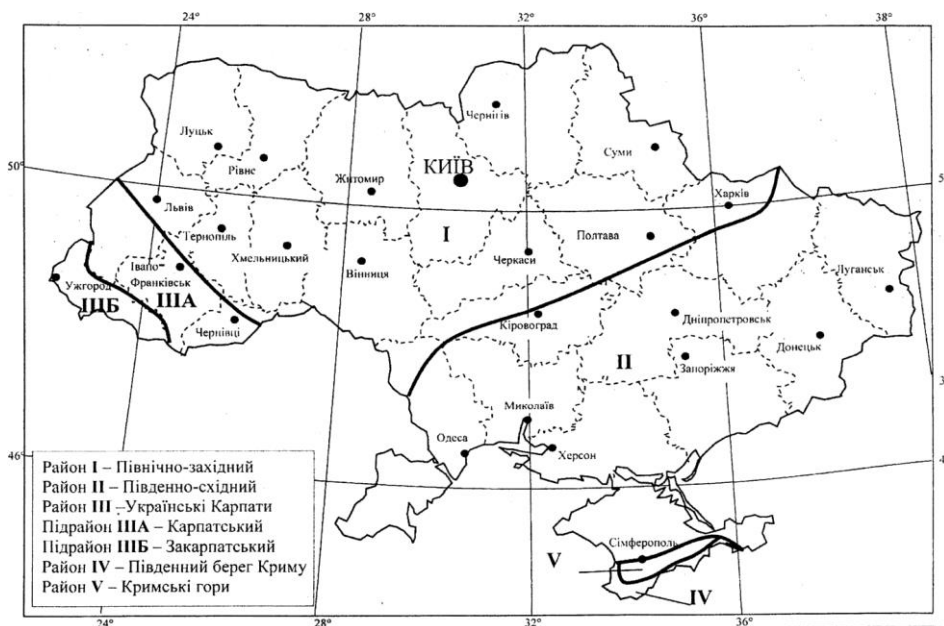


Рис. 1. Архітектурно-будівельне кліматичне районування території України

Таблиця 1

Порівняльні дані нормованих витрат гарячої води та спожитої теплової енергії для приготування гарячої води в різних містах України

Місто	Середні витрати гарячої води, м ³ /міс., на одну людину		Середнє теплове навантаження системи гарячого водопостачання на одну людину, кВт/міс.	
	Розрахункові	Нормовані	Зимове відповідно до розрахунків	Літнє відповідно до розрахунків
Київ	3,0	3,0	191,9	125,6
Одеса	3,45	3,957	220,7	270,8
Харків	3,0	3,0	191,9	125,6
Хмельницький	3,0	3,06	191,9	125,6

Наприклад, для міста Харкова середнє річне споживання теплової енергії на приготування гарячої води для житлового будинку складає 803,52 МВт/р. (з ціною за 1 ГКал 1539,50 грн вартість складає 1237019 грн).

Для міста Києва середнє річне споживання теплової енергії на приготування гарячої води складає 803,52 МВт/р. (з ціною за 1 ГКал 1539,50 грн вартість

складає 1230368 грн, тобто менше на 6651 грн, ніж у м. Харків).

Для міста Хмельницького середнє річне споживання теплової енергії на приготування гарячої води складає 807,84 МВт/р. (з ціною за 1 ГКал 1539,50 грн вартість складає 1243667 грн, тобто більше на 6648 грн, ніж у м. Харків).

Результати розрахунків середньорічних теплових навантажень

системи гарячого водопостачання в розрахунку на одного мешканця для різних міст України наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Розрахункове середнє річне теплове навантаження системи гарячого водопостачання на одного мешканця для різних міст України

Місто	Середнє годинне теплове навантаження системи гарячого водопостачання, кВт		Тривалість опалювального періоду, діб	Середньорічні теплові навантаження системи гарячого водопостачання на одного мешканця, МВт/р.
	Зимове	Літнє		
Київ	0,267	0,174	176	1,85
Одеса	0,307	0,376	158	2,9
Харків	0,267	0,174	179	1,86
Хмельницький	0,267	0,174	183	1,87

Графічне порівняння розрахункових середньогодинних витрат теплової енергії системи гарячого водопостачання в зимовий і літній періоди року на одного мешканця для міст Одеси та Харкова наведено на рис. 2.

На рис. 3 наведено графічне порівняння розрахункових середньорічних

витрат теплової енергії системи гарячого водопостачання на одного мешканця різних міст України.

Проаналізуємо фактичне та нормоване споживання гарячої води (табл. 3). У роботі [9] детально розглянуто дослідження динаміки зміни споживання гарячої води населенням України.

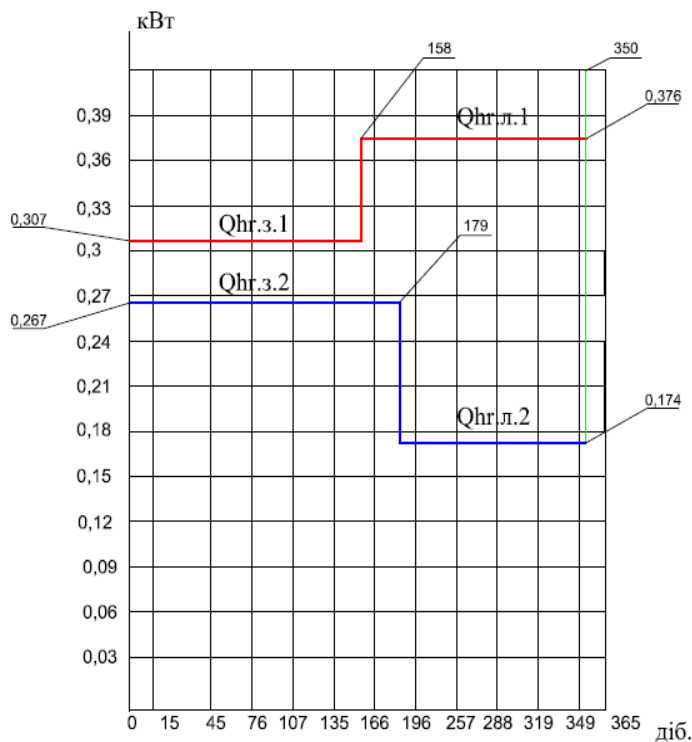


Рис. 2. Графічне порівняння розрахункових середньогодинних витрат теплової енергії системи гарячого водопостачання в зимовий і літній періоди року на одного мешканця для міст Одеси та Харкова

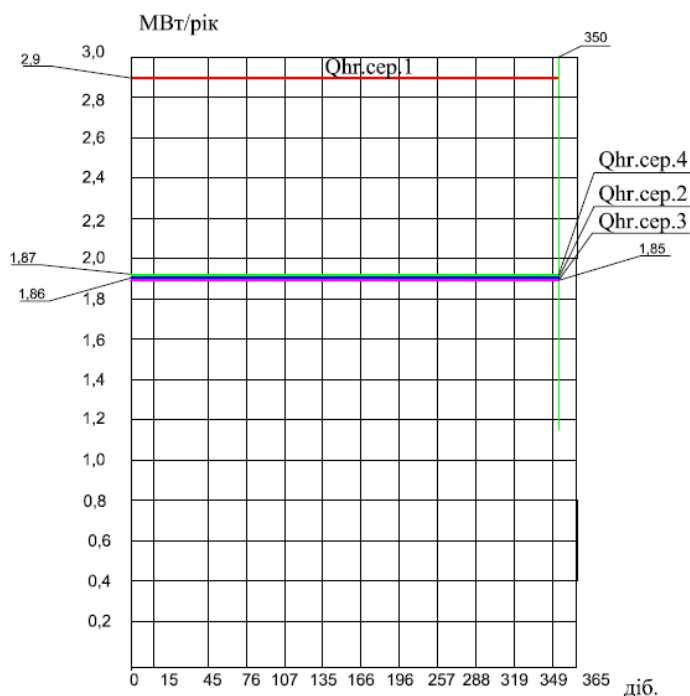


Рис. 3. Графічне порівняння розрахункових середньорічних витрат теплової енергії системи гарячого водопостачання на одного мешканця для різних міст України

Таблиця 3

Вихідні дані для проведення аналізу нормованого та фактичного споживання гарячої води

Місяць	Кількість мешканців, люд		Нормовані витрати гарячої води, м ³ /міс.		Фактичні витрати гарячої води, м ³ /міс.	
	Будинок	Квартира	Будинок	Квартира	Будинок	Квартира
Червень	504	4	1512	12,0	907,2	6,5
Липень			1512	12,0	690,4	4,2
Серпень			1512	12,0	642,6	3,4
Вересень			1512	12,0	1056,7	6,8
Жовтень			1512	12,0	1080,1	7,1
Листопад			1512	12,0	1078,6	7,2
Грудень			1512	12,0	1171,2	7,6
Разом					10584	84,0

Для проведення розрахунків взято дані станом на грудень 2021 року, оскільки через

повномасштабне вторгнення більшість мешканців були відсутні.

Як видно з наведених вище результатів розрахунків, фактичне споживання гарячої води як житловим будинком, так і квартирою менше, ніж нормована величина.

Однак слід звернути увагу, що, аналізуючи фактичне водоспоживання гарячої води житловим будинком, ми вибрали дані про кількість прописаних людей, проте дані про фактичну кількість мешканців відсутні.

Крім того, не було повної інформації про кількість квартир, які використовують децентралізовану систему гарячого водопостачання (електричний водонагрівач).

Тому для коректнішого порівняння були вибрані дані по квартирах, де кількість прописаних людей відповідає кількості мешканців.

Порівняльні дані нормованого та фактичного споживання гарячої води житловим будинком і квартирою наведені в табл. 4 за період червень – грудень 2021 р.

Відповідно до даних табл. 4 наведемо на рис. 4 графічне порівняння нормованого та фактичного споживання гарячої води житловим будинком, а на рис. 5 графічне порівняння нормованого та фактичного споживання гарячої води квартирою.

Таблиця 4

Фактичне споживання гарячої води багатоквартирним житловим будинком та однією з квартир цього будинку відповідно до показань лічильників гарячої води

Місяць	Витрати гарячої води у квартирі, м ³ /міс.		Різниця, м ³ /міс.	Витрати гарячої води в будинку, м ³ /міс.		Різниця, м ³ /міс.
	Нормована	Фактична		Нормована	Фактична	
Червень	12,0	6,5	5,5	1512	907,2	604,8
Липень	12,0	4,2	7,8	1512	690,4	821,6
Серпень	12,0	3,4	8,6	1512	642,6	869,4
Вересень	12,0	6,8	5,2	1512	1056,7	455,3
Жовтень	12,0	7,1	4,9	1512	1080,1	431,9
Листопад	12,0	7,2	4,8	1512	1078,6	433,4
Грудень	12,0	7,6	4,4	1512	1171,2	340,8
Разом	84,0	42,8	42,2	10584	6626,8	3957,2

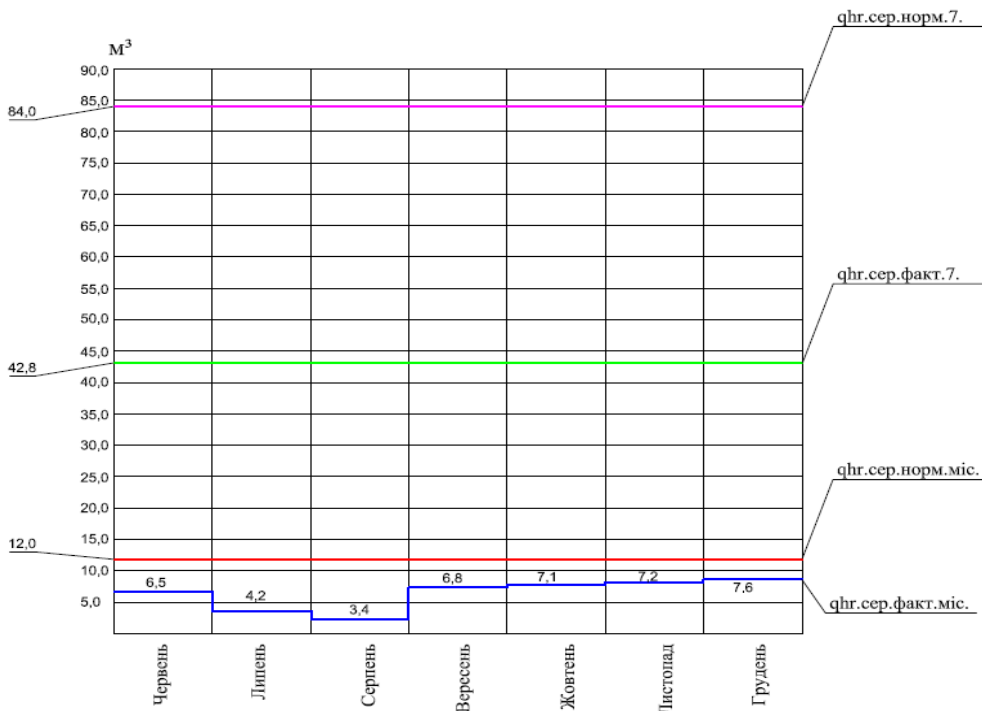


Рис. 4. Графічне порівняння нормованого та фактичного споживання гарячої води житловим будинком

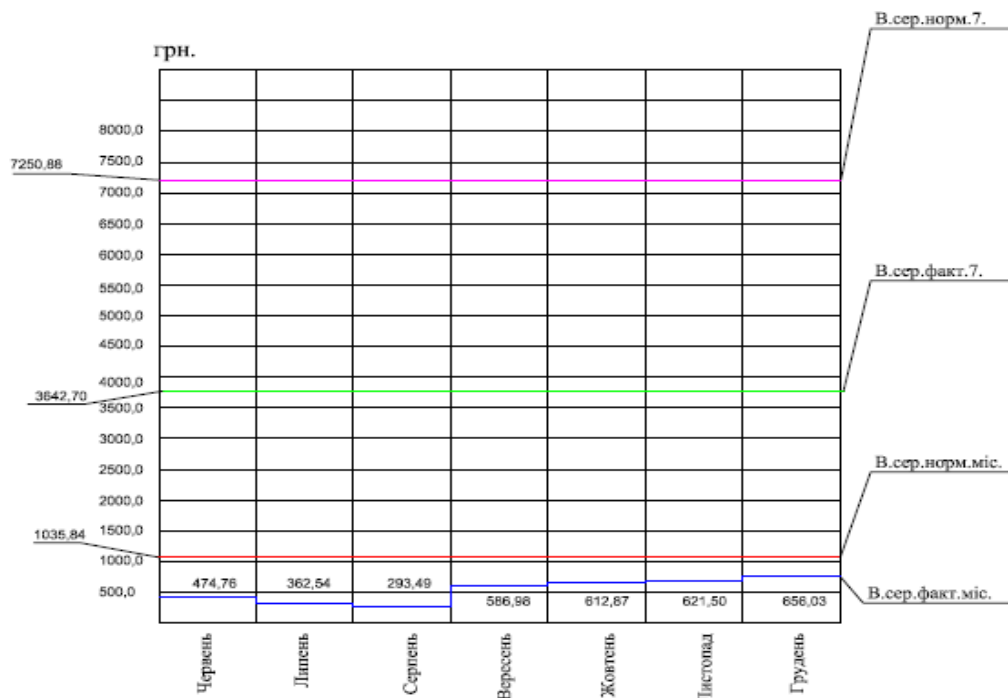


Рис. 5. Графічне порівняння вартості спожитої гарячої води квартирою, нормованих і фактичних витрат

Для побудови графіків були враховані ціни за 1 м³ гарячої води на одного

мешканця для квартир, у яких нема рушникосушильника. Станом на 2021 рік вартість складала 86,32 грн.

Загальна економія за період із червня по грудень 2021 року порівняно з фактичним і нормованим споживанням гарячої води у квартирі з чотирма мешканцями склала 3642,70 грн.

Висновки

З проведеного порівняння нормованих і фактичних витрат гарячої води можна зробити висновок, що фактичне споживання гарячої води буде меншим, ніж нормоване.

Фактичні витрати гарячої води залежать від температури гарячої води, а також системи гарячого водопостачання з циркуляційними трубопроводами або без них.

Для більш чіткого аналізу фактичного споживання гарячої води необхідний лічильник квартирної обліку. За наявності вузла комерційного обліку гарячої води на

вводі в житловий будинок неможливо чітко сказати, яка кількість квартир у житловому будинку має децентралізоване гаряче водопостачання, а також назвати точну кількість фактичних, а не прописаних людей.

Економія споживання гарячої води, порівнюючи фактичні та нормовані витрати, для розглянутої квартири з чотирма мешканцями (двоє дорослих і двоє дітей) за період червень – грудень 2021 року становить 42,2 м³, а у вартості це складає 3642,70 грн.

Кожна квартира [10] має бути обладнана приладами обліку холодної та гарячої води. Для можливого обліку витрат гарячої води залежно від її температури, а отже збільшення економії, лічильник гарячої води повинен мати можливість фіксації температури (багатотарифний лічильник гарячої води).

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Ч. I. Проектування. Ч. II. Будівництво. Київ: Мінрегіонбуд України. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/DBN00082>.
2. Кравченко Н. В., Кравченко В. С. До питання влаштування поквартирного підігрівання води в існуючих багатоквартирних будинках із централізованим гарячим водопостачанням. *Збірник наукових праць «Вісник Національного університету водного господарства та природокористування». Серія «Технічні науки»*. Рівне, 2018. Т. 3(83). С. 86-93. URL: <https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/tehn/article/view/844/>.
3. Тарадай О. М., Поволочко В. Б., Фоміч С. В. Дослідження динаміки споживання гарячої води населенням. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2017. Т. 88(2) 203. С. 203–206. URL: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1196>.
4. Taraday O. M., Bugai V. S., Gvozdeckiy O. V. Ways to modernize Ukraine's hot water supply systems. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2021. Т. 105 (3). С. 205-213. URL: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/605>.
5. Taraday O., Gvozdeckiy O., Fomich S. Urban renovation of hot water supply system. *Matec. Web of conferences*. Kharkov, 2017. № 116. P. 1-7. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2017/30/matecconf_trs2017_02034/matecconf_trs2017_02034.html.
6. Taraday O., Fomich S., Glamazdin P. Можливості зниження аварійності мереж централізованого гарячого водопостачання шляхом деаерації води. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2016. Т. 19. С. 117–124. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2016.19.117-124>.
7. Гламаздин П. М., Чепурна Н. В., Козячина Б. І. Вибір методики розрахунку теплового навантаження систем гарячого водопостачання об'єктів зі значною нерівномірністю

споживання. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2023. Т. 44. С. 39–48.
URL: <http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/289464>.

8. Shaflyk V. *Sovremennye systemy horiacheho vodosnabzheniya. Taki spravy*, 2010.

9. Фоміч С. В. Міська система централізованого гарячого водопостачання з вакуумною деаерацією: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 – *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання / Харків. нац. ун-т буд-цтва та арх-ри*. Харків, 2018. 140 с.

10. Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання: Закон України.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua>.

Тарадай Олександр Михайлович, доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: alekst1704@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-4239-9895.

Гвоздецький Олександр Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: npp-tghv@ukr.net. ORCID iD: 0000-0001-5590-4689.

Дяченко Сергій Володимирович, аспірант кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: dyachenkosv460@gmail.com.
ORCID iD: 0000-0003-0187-0684.

Гончаров Кирило Анатолійович, магістр з будівництва та цивільної інженерії, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: kirill02y@gmail.com.

ORCID iD: 0009-0009-1183-2834.

Taradai Oleksandr, Dr. Sc. (Tech.), Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: +38(050)3233333. E-mail: alekst1704@gmail.com.
ORCID iD: 0000-0002-4239-9895.

Gvozdeckiy Oleksandr, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: +38(050)8862488.

E-mail: npp-tghv@ukr.net. ORCID iD: 0000-0001-5590-4689.

Diachenko Serhii, postgraduate student, Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: +38(066)9626112. E-mail: dyachenkosv460@gmail.com.

ORCID iD: :0000-0003-0187-0684.

Goncharov Kyrylo, Master's degree in civil and structural engineering, O. M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy. Tel.: +38(095)5922715. E-mail: kirill02y@gmail.com. ORCID iD: 0009-0009-1183-2834.

Статтю прийнято 22.11.2024 р.

УДК 624.073:621.886

РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ШПОНКОВОГО З'ЄДНАННЯ З РУЙНУВАННЯМ ШВА ЗА СТИСНУТОЮ СМУГОЮ

**Канд. техн. наук О. О. Довженко, асп. М. О. Мищенко,
магістрант Г. Р. Шершерія**

CALCULATION OF THE BEARING CAPACITY OF A KEYED JOINT IN THE CASE OF FAILURE OF THE SEAM BY A COMPRESSED STRIP

**PhD (Tech.) O. O. Dovzhenko, postgraduate student M. O. Mishchenko,
master H. R. Shersheriia**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320729>

Анотація. Розроблений у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» варіаційний метод у теорії пластичності бетону використано як теоретичну основу для створення методики розрахунку несучої здатності шпонкових з'єднань збірних і збірно-монолітних залізобетонних конструкцій. Розглянуто руйнування шва за похилою стиснутою смугою шляхом діагонального розколювання. Запропонована залежність для визначення граничного навантаження враховує міцнісні характеристики бетону й арматури, геометричні параметри стику: висоту і глибину шпонки, кут нахилу опорного майданчика, ширину шва, кількість арматури.

Ключові слова: теорія пластичності, варіаційний метод, стиснута смуга, діагональне розколювання, шпонковий стик.

Abstract. The key joint with the seam of precast and precast- cast-in-place reinforced concrete structures is considered. The bearing capacity of the joint is proposed to be calculated using the method based on the variational method in the theory of concrete plasticity. In experimental studies, the destruction of the same along the inclined compressed strip was recorded. Diagonal splitting is considered as a theoretical model in this case. A kinematically possible scheme is proposed, which takes into account the specificity of the stress-strain state of the element in the limit state. The scheme includes 4 rigid discs formed with a failure surface: two wedges under the loading platforms, and two discs formed with the surfaces of the wedges and the tearing-off plane connecting their tops. The wedges approach each other, the other two move away perpendicular to the tearing-off plane. The failure surface consists of areas of shear with compression, on which directional plastic strain is localized and limit normal and tangential stresses with values according to the accepted condition of concrete strength, as well as areas of tension with principal stresses. The unknowns when solving the problem of the strength of a compressed strip under diagonal splitting are the two angles of inclination of the shear sections of the wedges to the splitting plane (γ_1 , γ_2), the ratio of the speeds of the rigid disks $k = V_1 / V_2$ and the limit load. After determining the jumps of the normal and tangential components of velocities on the sections of the failure surface, as well as their areas, the functional of the method is recorded, which is examined for a steady state. As a result, a formula for determining the limit load was obtained, which takes into account the strength characteristics of concrete and reinforcement, the geometric parameters of the joint (height and depth of the key, the angle of inclination of the support platform of the key, the width of the seam), the amount of reinforcement. To determine the values of the load, this function is examined for the extremum.

Keywords: theory of plasticity, variational method, compressed strip, diagonal splitting, keyed joint.

Вступ. У збірному та збірно-монолітному будівництві широко застосовують шпонкові з'єднання несучих елементів каркасів і стін, а також збірного та монолітного бетону. Для вдосконалення конструктивних рішень таких стиків [1] і безпечної та надійної експлуатації будівель необхідна достовірна й точна методика оцінювання їхньої несучої здатності, яка охоплює всі можливі випадки руйнування, що зустрічаються на практиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За результатами випробувань відомі чотири характерні випадки руйнування шпонкових з'єднань [2]: зсув без руйнування шпонки з можливими розривами поперечної арматури (опір шпонки при цьому не використовують, такий варіант можливий за певного нахилу опорної грані шпонки та за умови неперевищення величиною горизонтального зусилля обтиснення 20 %

величини вертикального зусилля); сколювання (зріз) двох типів: у результаті руйнування шпонки вздовж вертикальної тріщини або шва вздовж косої тріщини, що з'єднує протилежні кути шпонок; зминання в результаті руйнування шпонки шляхом роздроблення бетону замонолічування під опорними поверхнями. Залежно від геометричних параметрів шпонки і шва, їхнього армування, рівня обтиснення з перерахованих реалізують такий випадок, для якого характерне мінімальне значення граничного навантаження.

Для визначення несучої здатності шпонкових з'єднань, крім емпіричного підходу отримання залежностей, використовують теоретичні розрахункові моделі. У роботі [3] варіаційним методом у теорії пластичності бетону отримано формули для визначення граничного навантаження стиків з їх руйнуванням як за шпонкою (зріз першого типу та

роздроблення, за наданою вище класифікацією), так і швом (зріз другого типу) і встановлено межі їх реалізації залежно від параметрів з'єднання. Поверхня руйнування на кінематичній схемі, що враховує специфіку граничного напружено-деформованого стану елемента, складається з ділянок зрізу зі стиском, на яких локалізується спрямована пластична деформація та діють граничні нормальні і дотичні напруження зі значеннями за прийнятою умовою міцності бетону, а також ділянок розтягу з головними напруженнями.

Для багатошпонкових стиків зі швом запропоновано розглядати всі можливі випадки руйнування: $n+1$, де n – кількість шпонок у стикі: руйнування лише за шпонками (рис. 1, *a*); комбіноване (за шпонками і швом на рис. 1, *б-г*); руйнування лише за швом. За розрахункове приймають мінімальне з отриманих значень несучої здатності.

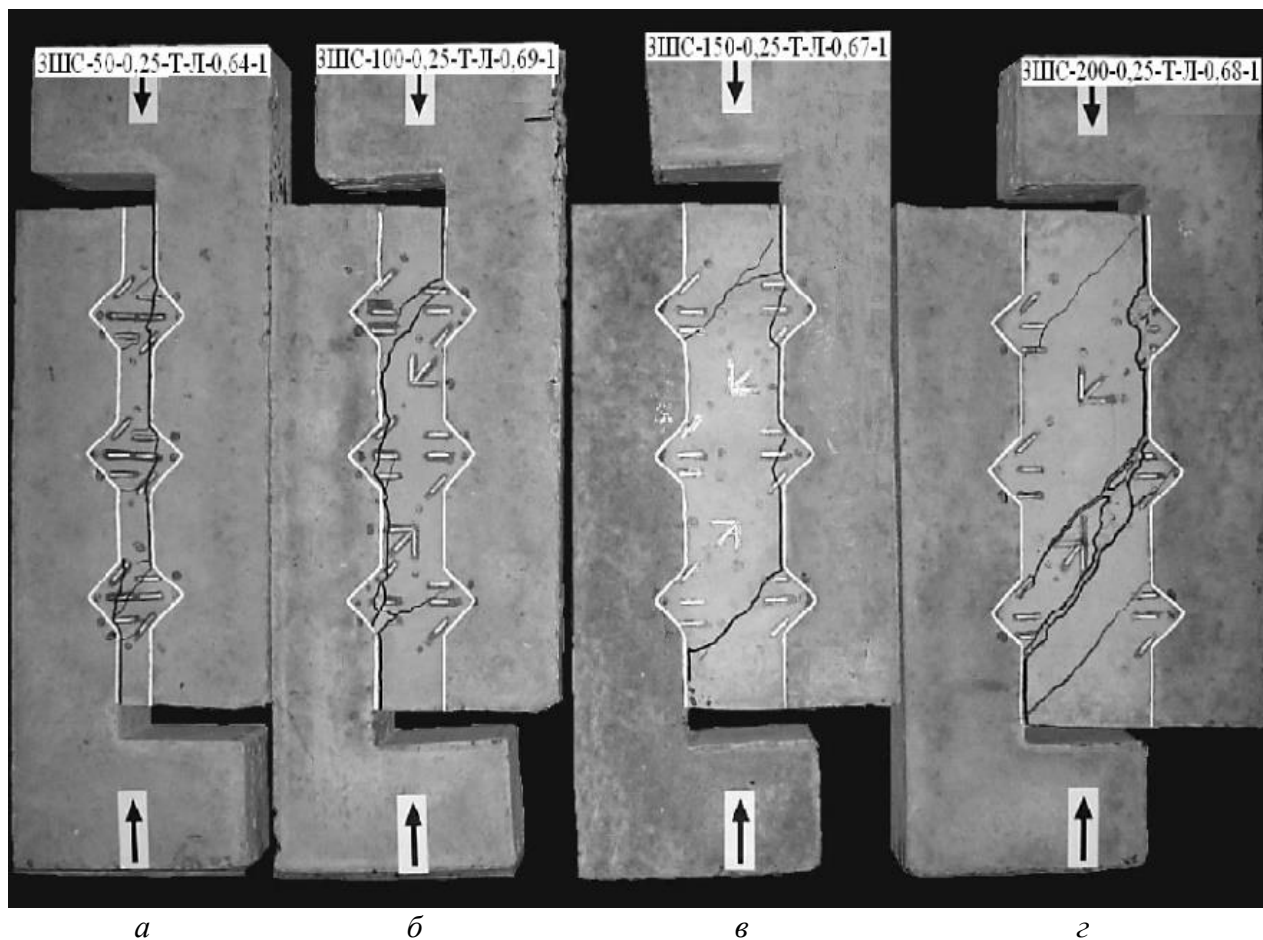


Рис. 1. Характер руйнування тришпонкових залізобетонних стиків трикутного профілю зі швом: *a* – за трьома шпонками; *b* – двома шпонками і швом у межах верхньої шпонки; *в* – двома шпонками і швом у межах нижньої; *г* – шпонкою з утворенням похилої смуги в межах висоти двох шпонок

Методика розрахунку, запропонована в роботі [4], реалізує верхню оцінку жорстко-пластичної моделі для визначення несучої здатності для зрізу вертикальних з'єднань стінових панелей із тросовими петлями. При цьому розглядають два ідеалізовані механізми руйнування стиків. Перший включає лінії текучості, розташовані тільки в напрямку дії поперечної сили (аналогія руйнування за шпонкою), при цьому між шпонками стик розглядають як гладкий, і опором ділянки між шпонками нехтують. Крім пластичної енергії, що розсіюється в лініях текучості, ураховують внесок тросових петель. Другий тип механізму, крім вертикальної, включає також і діагональні лінії текучості (аналогія руйнування за швом): система наявних ліній текучості розділяє з'єднання на декілька жорстких сегментів. Довжину і напрямки векторів їхнього відносного зсуву використовують для розрахунку енергії, що розсіюється в лініях текучості. Оскільки діагональні лінії перетинають анкери, то враховують їхній безпосередній внесок у внутрішню роботу. За розрахункове приймають мінімальне з отриманих значення навантаження.

У тілі шва з величиною середніх дотичних напружень $0,7f_{ct}$ [5] утворюється система похилих тріщин, які окреслюють стиснуті підкоси (смуги), нахилені до горизонталі, вони передають зусилля зсуву до моменту руйнування. У багатошпонкових стиках підкіс охоплює від однієї до трьох шпонок залежно від співвідношення t_j / u_k , де t_j – ширина шва, u_k – крок шпонок.

За певних параметрів стиків із трикутним профілем спостерігають [6] випадок руйнування, наведений на рис. 1, *г*.

У роботі [7] для оцінювання несучої здатності стиків використано теорію опору анізотропних матеріалів у стиснутому силовому потоці, що у з'єднаннях формуються між майданчиками завантаження.

У розрахунковій моделі [8] несуча здатність стику визначена опором стиснутого підкосу між шпонками, його ширина та кількість шпонок, які він охоплює, залежать від ширини шва, кроку шпонок і вмісту арматури.

Метою роботи є визначення опору похилої стиснутої смуги, яка може утворюватися в межах шва шпонкового стику і визначати його несучу здатність розробленим у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» варіаційним методом у теорії пластичності бетону.

Основна частина дослідження.

Послідовність вирішення завдання опору бетонного елемента варіаційним методом така:

- моделюють характер руйнування – формування кінематично можливої схеми: із використанням геометричних параметрів окреслюють обрис поверхні руйнування та задають напрямки руху (швидкості) окремих жорстких дисків, виділених руйнівною поверхнею; зазвичай невідомими геометричними параметрами є кути нахилу ділянок руйнування до площини дії сил, а також відносні значення швидкостей; геометричні параметри стику та міцнісні характеристики бетону задані;

- знаходять стрибки швидкостей на ділянках поверхні руйнування та площі останніх;

- записують функціонал варіаційного методу, виконують відповідні математичні перетворення;

- функціонал досліджують на стаціонарний стан (прирівнюють до 0);

- виводять формулу для підрахунку граничного навантаження у функції від невідомих параметрів;

- цю функцію досліджують на екстремум (безумовний за поступального руху жорстких дисків на кінематичній схемі й умовний в іншому випадку: як додаткові умови використовують рівняння рівноваги);

- визначають значення граничного навантаження і всіх невідомих параметрів.

Розглянуто розрахункову модель, у межах якої стиснута похила смуга руйнується від діагонального розколювання (рис. 2, а) (руйнування за діагональною тріщиною вздовж стиснутої смуги [2]).

Перший етап розроблення методики її розрахунку – створення кінематично можливої схеми руйнування стику, що має врахувати особливості його роботи в граничному стані.

У розгляданому випадку в теоретичній моделі на стадії руйнування шов розділяється на чотири жорсткі диски: два клини 1 під майданчиками, через які передається навантаження (у загальному випадку клини можуть бути несиметричними, останнє обумовлено співвідношенням геометричних параметрів шпонкового з'єднання) і два диски 2, окреслені зсувними ділянками клинів і площиною розколювання, що з'єднує їхні вершини (рис. 2, б).

Клини за дії зовнішнього навантаження рухаються назустріч один одному, спричиняючи віддалення двох інших дисків у напрямку, перпендикулярному до площини розколювання. Невідомих за розв'язання задачі буде чотири: два кути нахилу ділянок зсуву клинів до площини розколювання (γ_1, γ_2), відношення швидкостей руху жорстких дисків $k = V_1 / V_2$ і граничне навантаження P_1 , направлене вздовж площини розколювання (рис. 3).

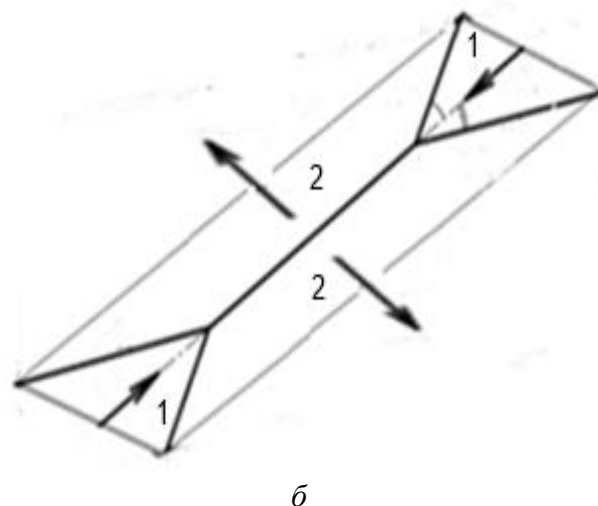
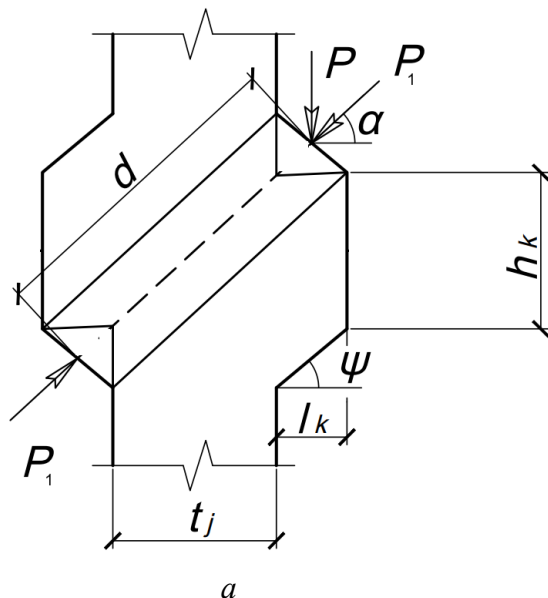


Рис. 2. Розколювання похилої стиснутої смуги в межах шва (а); кінематика руху жорстких дисків (б)

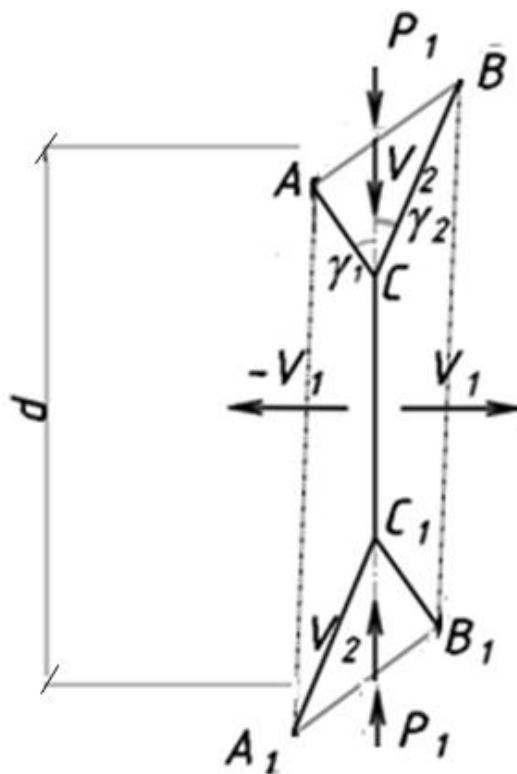


Рис. 3. Кінематична схема руйнування за діагонального розколювання

Відповідно до прийнятої послідовності розв'язання задач опору елементів варіаційним методом у теорії пластичності бетону знаходять стрибки нормальних і дотичних складових швидкостей на ділянках поверхні руйнування AC, BC, CC₁, а також площі цих ділянок:

- на ділянках AC і BC розриви швидкостей відповідно обчислюють як

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_{n1} &= V_1 \cos \gamma_1 - V_2 \sin \gamma_1 \\ \Delta V_{t1} &= V_1 \sin \gamma_1 + V_2 \cos \gamma_1 \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_{n2} &= V_1 \cos \gamma_2 - V_2 \sin \gamma_2 \\ \Delta V_{t2} &= V_1 \sin \gamma_2 + V_2 \cos \gamma_2 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де γ_1 та γ_2 – кути між ділянками руйнування AC і BC і площиною відриву (розколювання);

- площі ділянок AC та BC відповідно дорівнюють

$$S^{AC} = \frac{l_k}{2 \sin \gamma_1} b; \quad (3)$$

$$S^{BC} = \frac{l_k}{2 \sin \gamma_2} b, \quad (4)$$

де b – товщина елемента;

- для ділянки CC₁ розриви швидкостей обчислюються як

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_n &= 2V_1 \\ \Delta V_t &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

а її довжина дорівнює (рис. 4)

$$CC_1 = d / 2 - (d_1 + d_2), \quad (6)$$

де $d = \sqrt{(h_k - l_k \operatorname{tg} \psi)^2 + (t_j + l_k)^2}$,

де ψ – кут нахилу до горизонталі опорної грані шпонки;

$$d_1 = \frac{l_k}{2 \operatorname{tg} \gamma_1}, \quad d_2 = \frac{l_k \operatorname{tg} \psi}{2}.$$

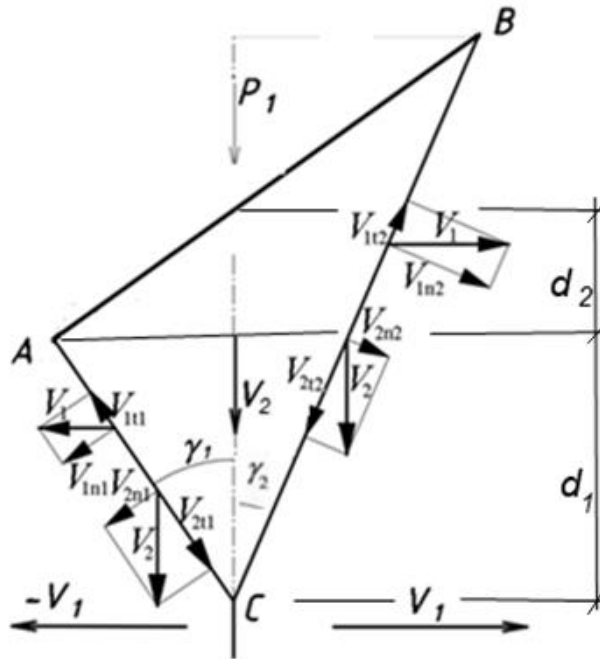


Рис. 4. Визначення стрибків швидкостей на поверхні руйнування АСВ
Площа ділянки СС₁

$$S^{CC_1} = (d / 2 - l_k \frac{(1 + \operatorname{tg} \gamma_1 \operatorname{tg} \psi)}{2 \operatorname{tg} \gamma_1}) b. \quad (7)$$

Далі записують компоненти функціонала віртуальних швидкостей окремо для ділянок зсуву зі стиском:

- АС

$$J_{AC} = m \left[2B \sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{\Delta V_{t1}}{\Delta V_{n1}} \right)^2} - 1 \right] \Delta V_{n1} S^{AC} =$$

$$= m \left[2B \sqrt{(k - \operatorname{tg} \gamma_1)^2 + 0,25 (k \operatorname{tg} \gamma_1 + 1)} - (k - \operatorname{tg} \gamma_2) \right] \frac{l_k}{2 \operatorname{tg} \gamma_1} b, \quad (8)$$

де $m = f_c - f_{ct}$, f_c , f_{ct} – міцність бетону за монолічування за стиску і розтягу відповідно;

$$B^2 = \left(1 + \chi / (1 - \chi)^2\right) / 3, \quad \chi = f_{ct} / f_c;$$

- СВ

$$\begin{aligned} J_{CB} &= m \left[2B \sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{\Delta V_{t2}}{\Delta V_{n2}} \right)^2} - 1 \right] \Delta V_{n2} S^{CB} = \\ &= m \left[2B \sqrt{(k - tg \gamma_2)^2 + 0,25 (ktg \gamma_2 + 1)} - (k - tg \gamma_2) \right] \frac{l_k}{2tg \gamma_2} b; \end{aligned} \quad (9)$$

ділянки відриву CC_1

$$J_{CC_1} = 2f_{ct} V_1 S^{CC_1} = f_{ct} k (d - l_k \frac{(1 + tg \gamma_1 tg \psi)}{tg \gamma_1}) b; \quad (10)$$

а також дії зовнішніх сил

$$J_P = P_1. \quad (11)$$

З поєднанням усіх складових функціонал набуде вигляду

$$\begin{aligned} J &= m \left[2B \sqrt{(k - tg \gamma_1)^2 + 0,25 (ktg \gamma_1 + 1)} - (k - tg \gamma_1) \right] \frac{l_k}{2tg \gamma_1} + \\ &+ m \left[2B \sqrt{(k - tg \gamma_2)^2 + 0,25 (ktg \gamma_2 + 1)} - (k - tg \gamma_2) \right] \frac{l_k}{2tg \gamma_2} + \\ &+ f_{ct} (d - l_k \frac{(1 + tg \gamma_1 tg \psi)}{tg \gamma_1}) + \frac{P_1}{b}. \end{aligned} \quad (12)$$

Після відповідних перетворень і дослідження функціонала (12) на стаціонарний стан отримано формулу для

визначення граничного навантаження, що відповідає мінімальній потужності пластичної деформації,

$$\begin{aligned} \frac{P_1}{mb} = & \left[2B\sqrt{(k - tg\gamma_1)^2 + 0,25(k - tg\gamma_1 + 1)^2} - (k - tg\gamma_1) \right] \frac{l_k}{2tg\gamma_1} + \\ & + \left[2B\sqrt{(k - tg\gamma_2)^2 + 0,25(k - tg\gamma_2 + 1)^2} - (k - tg\gamma_2) \right] \frac{l_k}{2tg\gamma_2} + \\ & + \frac{f_{ct}}{m} \left(d - l_k \frac{(1 + tg\gamma_1 tg\psi)}{tg\gamma_1} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Для встановлення залежності між невідомими кутами нахилу майданчиків руйнування до вертикалі γ_1 та γ_2 використаємо рівняння

$$\frac{l_k}{2tg\gamma_2} = l_k tg\psi + \frac{l_k}{2tg\gamma_1}. \quad (14)$$

Кути нахилу клина ущільнення γ_1 та γ_2 пов'язані між собою залежністю

$$tg\gamma_2 = \frac{tg\gamma_1}{2tg\psi tg\gamma_1 + 1}. \quad (15)$$

Вертикальне рівномірно розподілене за опорною поверхнею шпонки навантаження

$$\begin{aligned} \frac{q_u}{m} = \frac{P_1 \sin \alpha}{ml_k b} = \frac{P}{ml_k b} = \\ \left(\left[2B\sqrt{(k - tg\gamma_1)^2 + 0,25(k - tg\gamma_1 + 1)^2} - (k - tg\gamma_1) \right] \frac{1}{2tg\gamma_1} + \right. \\ \left. + \left[2B\sqrt{(k - tg\gamma_2)^2 + 0,25(k - tg\gamma_2 + 1)^2} - (k - tg\gamma_2) \right] \frac{1}{2tg\gamma_2} + \right. \\ \left. + \frac{f_{ct}}{m} \left(\frac{d}{l_k} - \frac{(1 + tg\gamma_1 tg\psi)}{tg\gamma_1} \right) \right) \sin \alpha, \end{aligned} \quad (16)$$

де α – кут нахилу стиснутої смуги до горизонталі, $tg\alpha = \frac{h_k - l_k tg\psi}{t_j + l_k}$; $\sin \alpha = \sqrt{\frac{tg^2 \alpha}{1 + tg^2 \alpha}}$.

$$\frac{d}{l_k} = \sqrt{\left(\frac{h_k}{l_k} - \frac{l_k}{l_k} tg\psi \right)^2 + \left(\frac{t_j}{l_k} + \frac{l_k}{l_k} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\gamma} - tg\psi \right)^2 + \left(\frac{t_j}{l_k} + 1 \right)^2},$$

де $\gamma = l_k / h_k$, P – вертикальне навантаження на шпонку.

Наступним етапом розв'язання задачі опору є пошук безумовного екстремуму функції (16).

У разі одноярусного армування стику у формулу (16) додають складову, що

$$\text{враховує його вплив} - \frac{\sigma_y A_{sw} k}{b_k h_k} \frac{1}{\gamma} \cos \alpha .$$

Висновки. Варіаційним методом у теорії пластичності бетону, розробленим у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,

отримано розв'язок задачі опору стиснутої похилої смуги з її руйнуванням шляхом діагонального розколювання. На сьогодні запропонована методика розрахунку опору стиків враховує всі можливі випадки їхнього руйнування, визначальні фактори (геометричні параметри, міцнісні характеристики матеріалів, обтиснення, армування).

Список використаних джерел

1. Dovzhenko O., Pohribnyi V., Kyrychenko V., Kuznietsova I., Bulbakha O. Improved structural solutions of keyed joints of modern structural systems from reinforced concrete. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2678 (1), 020007. <https://doi.org/10.1063/5.0118546>.
2. Elliot K. S. *Precast Concrete Structures*. 2th ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC. 2017. 299 p.
3. Збірник наукових розробок планувальних та конструктивних рішень споруд цивільного захисту: монографія / А. В. Гасенко, О. О. Довженко, В. В. Погрібний та ін. Полтава: Астроя, 2023. 209 с. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/17314>.
4. Jørgensen H. B., Hoang L. C. Load carrying capacity of keyed joints reinforced with high strength wire rope loops. *In Proceedings of fib Symposium Concrete – Innovation and Design, Copenhagen May 18-20, 2015*. 13 p. URL: <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/111902767/Joergensen.pdf>.
5. Герасимова И. А. Испытание шпоночных замоноличенных вертикальных стыков на сдвиг. *Конструкции жилых зданий*. 1987. С. 72–76.
6. Довженко О. О. Міцність шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів: експериментальні дослідження: монографія. Полтава: ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2015. 181 с.
7. Соколов Б. С. Теоретические основы сопротивления бетона и железобетона при сжатии. *Известия вузов. Строительство*. 1993. № 9. С. 39–43.
8. Nielsen M. P., Hoang L. C. *Limit Analysis and Concrete Plasticity*. 3rd ed. CRC Press, 2016. 788 p.

Довженко Оксана Олександрівна, кандидат технічних наук, професор кафедри будівельних конструкцій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0002-2266-2588. Тел.: +38 (050) 982-58-54. E-mail: o.o.dovzhenko@gmail.com.

Мищенко Микола Олегович, аспірант кафедри будівництва та цивільної інженерії, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка. ORCID iD: 0009-0006-4419-649X. Тел.: +38 (095) 614-15-62. E-mail: mishchenkof@gmail.com.

Шершерія Георгій Русланович, магістрант кафедри будівництва та цивільної інженерії, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка. ORCID iD: 0009-0001-7862-9824. Тел.: +38 (096) 548-32-44. E-mail: sherger.poems@gmail.com.

Dovzhenko Oksana Oleksandrivna, PhD (Tech), Professor, department of building structures, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0002-2266-2588. Tel.: +38 (050) 982-58-54. E-mail: o.o.dovzhenko@gmail.com.

Myshchenko Mykola Olegovich, postgraduate student, department of construction and civil engineering, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0009-0006-4419-649X. Tel.: +38 (095) 614-15-62. E-mail: mishchenkof@gmail.com.

Shersheriia Heorgii Ruslanovych, master's student, department of construction and civil engineering, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0009-0001-7862-9824. Tel.: +38 (096) 548-32-44. E-mail: sherger.poems@gmail.com.

Статтю прийнято 05.12.2024 р.

УДК 691.3:666.972.2

ВІБРОПРЕСОВАНИ ДРІБНОЗЕРНИСТІ НАДЖОРСТКІ БЕТОНИ З ЗАСТОСУВАННЯМ МІНЕРАЛЬНИХ СУМІШЕЙ НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ ПЕРЕРОБЛЕНИХ ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДВАЛІВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ УКРАЇНИ

Асп. І. С. Лічнов, д-р техн. наук М. А. Саницький, канд. техн. наук В. О. Каганов

VIBROPRESSED FINE-GRAINED ULTRA-HARD CONCRETE USING NEW GENERATION MINERAL MIXTURES BASED ON RECYCLED ASH SLAG DUMPS OF THERMAL POWER PLANTS OF UKRAINE

Postgraduate student I. S. Lichnov, Dr. Sc. (Tech.) M. A. Sanytsky, PhD (Tech.) V. O. Kahanov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320732>

***Анотація.** Масове виготовлення дрібнозернистих наджорстких бетонів для сучасних бетоноформувальних комплексів імпортного виробництва (Німеччина, США, Туреччина) тісно пов'язано з необхідністю використання портландцементів першого і другого типів і питаннями застосування ефективних золошлакових сумішей як мінеральних домішок із метою зменшення витрат зв'язного в процесі вібропресування будівельних виробів.*

Ситуація, що склалася в Україні у 2024 році з суттєвим руйнуванням більшості діючих потужних ТЕС під час російських ракетних обстрілів, призвела до створення штучного дефіциту виробництва золи винесення сухого відбору та відсутності цього цінного матеріалу на підприємствах генерації електричної енергії. Між тим питання економії зв'язного у вигляді портландцементів першого і другого типів для масового виготовлення бетонних виробів і надалі стоїть на порядку денному сучасних підприємств будівельної індустрії. Стаття авторів присвячена дослідженню вібропресованих дрібнозернистих бетонів на основі наджорстких сумішей, які активно впроваджують у Західному регіоні України, де вже зараз функціонує ціла низка технологічних ліній із новітніми бетоноформувальними комплексами імпортного виробництва. Проблеми застосування перероблених золошлакових відвалів, накопичених на українських ТЕС у минулі роки, відкривають нові перспективи щодо виготовлення сучасних вібропресованих виробів на основі наджорстких сумішей із підвищеними експлуатаційними характеристиками за значної економії використаного портландцементу як зв'язного для будівельних елементів. У статті колектив авторів кафедри будівельного виробництва ознайомлює науково-технічну аудиторію з останніми дослідженнями, здійсненими у Львівській політехніці в цій царині, надаючи певні результати вивчення впливу на властивості наджорстких вібропресованих бетонів із використанням

мінеральних очищених класифікованих сумішей марки SM 0/40/70 (ДСТУ 2.7-128:2006 «Добавка активна мінеральна») на часткову заміну портландцементів першого і другого типів виробництва ПАТ «Івано-Франківськцемент».

Ключові слова: мінеральна суміш, золошлакові відвали теплових електростанцій, вібропресовані дрібнозернисті бетони, наджорсткі бетонні суміші, бетоноформувальні комплекси.

Abstract. Mass production of fine-grained ultra-hard concrete for modern blockmaking machines (production of Germany, USA, Turkey) is closely related to the need to use Portland cements CEM I and CEM II and the issues of using effective ash-slag mixtures as mineral additives to reduce the consumption of binder in the process of vibropressing construction products.

The situation that developed in 2024 with the significant destruction of most of the powerful thermal power plants operating in Ukraine during Russian missile attacks led to the creation of an artificial deficit in the production of dry-selection fly ash and the absence of this valuable material at electricity generation enterprises. Meanwhile, the issue of saving binder in the form of Portland cements CEM I and CEM II in the mass production of concrete products continues to be on the agenda of modern construction industry enterprises. The authors' article is devoted to the study of vibropressed fine-grained concrete based on ultra-hard mixtures, which are actively being introduced in the Western region of Ukraine, where several technological lines with the latest blockmaking machines of imported production are already operating. The problems of using recycled ash and slag heaps, which have accumulated in significant quantities at Ukrainian thermal power plants in recent years, open new prospects in the manufacture of modern vibropressed products based on ultra-hard mixtures with increased performance characteristics with significant savings in the amount of Portland cement used as a binder for building elements. As a result of the publication, the team of authors of the Department of Construction Production introduces the scientific and technical audience to the latest research carried out at the Lviv Polytechnic in this area, which presents certain results of studying the impact on the properties of ultra-hard vibropressed concretes using mineral purified classified mixtures SM 0/40/70 (DSTU 2.7-128:2006 «Active mineral additive») for partial replacement of Portland cements (CEM I and CEM II) produced by «Ivano-Frankivskcement».

Keywords: mineral mixture, ash and slag heaps of thermal power plants, vibro-pressed fine-grained concretes, ultra-hard concrete mixtures, blockmaking machines.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загалом проблематиці використання золи винесення сухого відбору ТЕС у процесі виготовлення бетонних сумішей різноманітного призначення було присвячено значну кількість наукових досліджень, серед яких слід зазначити публікації Леоніда Дворкіна [1], Ванесси Клапченко, Григорія Краснянського, Ірини Азнаурян, Ірини Кузнецової [2]. Воєнна агресія російської федерації проти України, направлена на знищення енергетичної інфраструктури на діючих генеруючих українських підприємствах, викликала серйозні проблеми в постачанні на технологічні лінії будівельної індустрії золи винесення сухого

відбору ТЕС як активної мінеральної добавки і поставило підприємства з виготовлення індустріального і товарного бетону в ситуацію, що викликає потребу в заміні золи винесення сухого відбору ТЕС на ефективніші спеціально підготовлені золошлакові суміші з накопичених раніше відвалів відходів теплових електростанцій. За даними проекту сучасних нормативних документів, гармонізованих із європейськими нормами [3], і наукових звітів із вивчення властивостей золошлакових відвалів західно-українських ТЕС [4] за десятиліття роботи генеруючих підприємств накопичилася значна кількість золошлакових відвалів із різним гранулометричним складом таких відходів

(Бурштинська ТЕС – до 25 млн т, Добротвірська ТЕС – приблизно 18 млн т, Ладизинська ТЕС – близько 20 млн т). Потенціал переробки золошлакових відвалів для виготовлення мінеральних активних добавок із відповідним рівнем очищення та певним рівнем класифікації на ТЕС Західного регіону України є досить потужним.

Наукові роботи спеціалістів у галузі енергетики та відомих фахівців України з будівельного матеріалознавства: О. О. Хлопицького, В. П. Ковальського, О. О. Сідкана, В. І. Мосьпана, А. О. Кесової, О. М. Денисюка, Л. А. Нудченка, О. В. Дзюбана, В. М. Дерев'янка, В. В. Колохова, С. В. Мальцева свідчать, що золівмісні компоненти в будівельних матеріалах, бетонах і розчинах на основі портландцементів як зв'язного мають значні перспективи і створюють резерви в економії зв'язного, що покращує гранулометричний склад як товарних готових бетонних продуктів, так і вібропресованих бетонів на основі жорстких і наджорстких сумішей [5-9].

Основна частина. Спеціалістами кафедри будівельного виробництва НУ «Львівська політехніка» за керівництвом М. А. Саницького давно досліджують фізико-хімічні та фізико-механічні властивості вібропресованих дрібнозернистих бетонів на основі наджорстких сумішей. Роль заміни частини

витрат портландцементу першого і другого типу на активні мінеральні домішки є значною, оскільки, крім економії зв'язного, такий процес дає змогу покращити гранулометричний склад бетонних наджорстких сумішей і основні експлуатаційні властивості дрібнозернистих вібропресованих бетонів [10-12].

У результаті здійснених на кафедрі протягом 2023-2024 років комплексних наукових досліджень було виявлено ефективність процесу застосування перероблених золошлакових відвалів ТЕС нового покоління як активних мінеральних добавок у дрібнозернистих бетонах у процесі їхнього вібропресування на сучасних бетоноформуваньних комплексах.

У табл. 1 подано результати фізико-хімічного аналізу з визначенням елементного складу мінеральної очищеної та класифікованої золошлакової суміші марки SM 0/40/70, виготовленої «Зеленою Карбонатною компанією» (м. Київ) у 2024 році на основі золошлакових відходів Ладизинської ТЕС.

Елементний склад досліджуваної в публікації активної мінеральної золошлакової добавки свідчить про ефективні показники мінеральної домішки як зв'язного між компонентами наджорсткої бетонної суміші, чим частково можна замінити дію портландцементу як зв'язного у вібропресованих бетонах.

Таблиця 1

Результати фізико-хімічного аналізу визначення елементного складу мінеральної очищеної класифікованої золошлакової суміші марки SM 0/40/70

Номер	Елемент	Серія	Інтенсивність	Концентрація
14	SiO ₂	К	318732	57.723889±0.071057%
13	Al ₂ O ₃	К	58604	19.865274±0.092967%
26	Fe ₂ O ₃	К	760059	13.286811±0.029998%
19	K ₂ O	К	126145	4.014863±0.022919%
20	CaO	К	93854	2.785686±0.018395%
22	TiO ₂	К	66275	1.652294±0.010781%
16	SO ₃	К	2271	0.209265±0.011197%
25	MnO	К	6206	0.086376±0.005915%

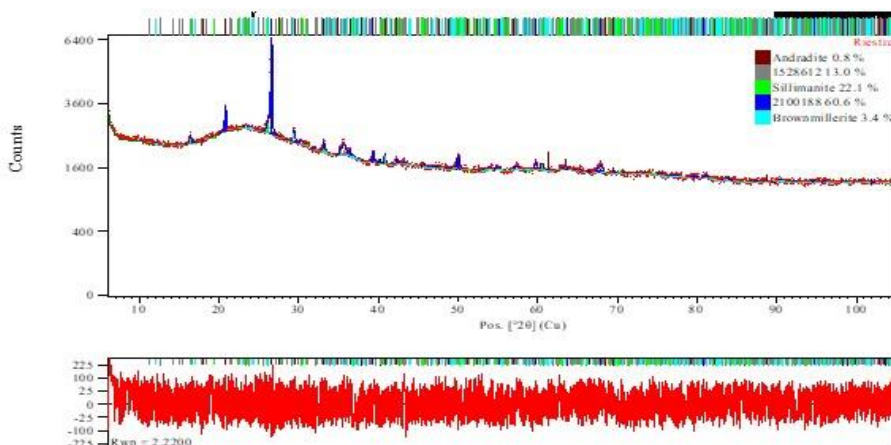
38	SrO	K	75979	0.082864±0.000850%
30	ZnO	K	1315	0.053995±0.014059%
40	ZrO ₂	K	62904	0.052140±0.000670%
37	Rb ₂ O	K	36051	0.040067±0.000766%
28	NiO	K	2501	0.038041±0.005349%
24	Cr ₂ O ₃	K	2462	0.031299±0.004777%
29	CuO	K	1170	0.028836±0.009325%
33	As ₂ O ₃	K	9531	0.020881±0.000677%
82	PbO	K	6477	0.014977±0.000992%
39	Y ₂ O ₃	K	15119	0.012444±0.000556%

Подальші фізико-хімічні дослідження мінеральної очищеної та класифікованої суміші на основі спеціально підготовлених відвалів Ладжинської ТЕС марки SM 0/40/70 демонструють результати рентгено-фазового аналізу складу досліджуваного матеріалу (рис. 1).

Хімічний силікатний аналіз складу активної мінеральної суміші з перероблених золошлакових відвалів Ладжинської ТЕС марки SM 0/40/70, наведений на рис. 2, свідчить про властивості досліджуваного матеріалу суттєво впливати на щільність вібропресованої дрібнозернистої бетонної суміші. Хімічний склад мінеральної активної суміші марки SM 0/40/70 нового покоління дає змогу отримати значно знижену водопотребу бетонної суміші, що особливо цінно для формування вібропресованих наджорстких бетонів на сучасних бетоноформувальних комплексах.

Як основне зв'язного у вібропресованих дрібнозернистих бетонах із використанням перероблених золошлакових відвалів ТЕС Західного та Центрального регіону України застосовували портландцементи ПАТ «Івано-Франківськцемент» активністю 500. Порівняно з високоміцними бетонами (що мають міцність більше 50 МПа), виготовленими на основі портландцементу ПЦ ІІ/А-Ш-400Р-Н, бетони, вироблені на основі портландцементу ПЦ ІІ/А-Ш-500Р-Н мають вищу ранню міцність, яка у свою чергу дає змогу гарантовано отримувати у свіжовідформованих вібропресованих виробках на основі наджорстких сумішей потрібну проектну міцність на стиск і розтяг зі згином. У табл. 2 наведені результати фактичних фізико-механічних характеристик портландцементу ПАТ «Івано-Франківськцемент».

Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



Peak List: (Bookmark 3)

Number of used phases	5
Number of variables	188
Number of constraints	5
Zero shift/ °2Theta	0.000000
Specimen displacement/ mm	0.025929
Specimen Packing Factor	0.000000
Profile function	Pseudo Voigt
Background	Use available background
R (expected)/ %	2.32650
R (profile)/ %	1.71942
R (weighted profile)/ %	2.22002
GOF	0.95423
d-statistic	1.09433
Mixture MAC/ cm^2/g	63.50
U standard	0.000000
V standard	0.000000
W standard	0.010000
TCH U Left	0.000000
TCH V Left	0.000000
TCH W Left	0.010000
TCH Z Left	0.000000
TCH X Left	0.000000
TCH Y Left	0.000000
TCH U Right	0.000000
TCH V Right	0.000000
TCH W Right	0.010000
TCH Z Right	0.000000

Рис. 1. Рентгено-фазовий аналіз активної мінеральної суміші з перероблених золошлакових відвалів ТЕС

Таблиця 2

Результати фізико-механічних характеристик портландцементу ПАТ «Івано-Франківськцемент»

Найменування	Питома поверхня, м ² /кг	НГТ, %	Терміни тужавіння, хв		Тонина помолу, %
			початок	кінець	
1	2	3	4	5	6
ПЦ I – 500P-H	435	30,0	150	240	0,4
ПЦ II/A-B-500P-H	477	30,5	140	220	0,8

Продовження табл. 2

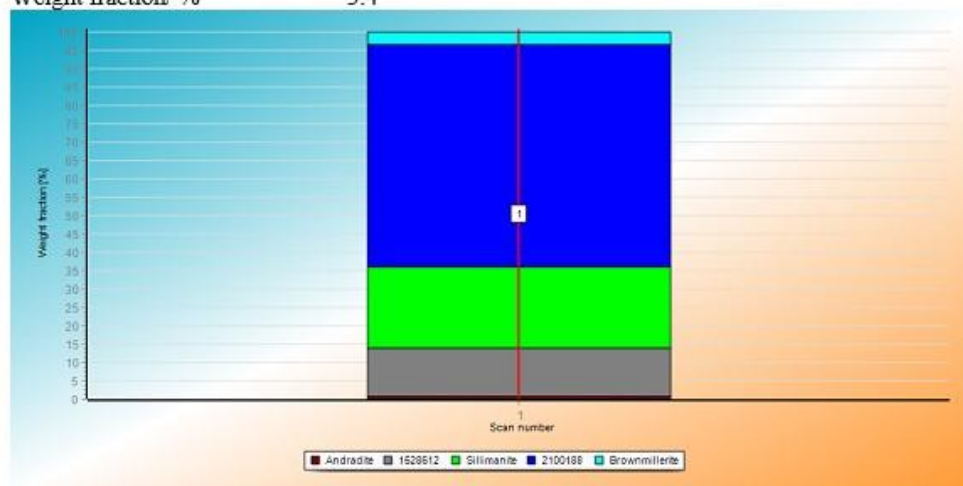
1	2	3	4	5	6
ПЦ П/А-Ш-500Р-Н (березень 2023)	425	30,0	160	250	0,8
ПЦ П/А-Ш-500Р-Н (травень 2023)	421	30,0	150	220	0,4
ПЦ П/А-Ш-500Р-Н (серпень 2023)	430	30,0	150	230	0,4

Pattern List: (Bookmark 4)

Ref. Code	Score	Compound Name	Displ. [$^{\circ}2\theta$]	Scale Fac.	Chem. Formula
96-210-0189	19	2100188	-0.262	0.231	Si _{3,00} O _{6,00}
96-900-6526	10	Sillimanite	-0.277	0.094	Al _{8,00} Si _{4,00} O _{20,00}
96-152-8613	10	1528612	-0.149	0.058	O _{96,00} Fe _{64,00}
96-900-1186	10	Andradite	-0.379	0.068	Si _{24,00} Fe _{16,00} Ca _{24,00} O _{96,00}
96-900-3344	8	Brownmillerite	-0.303	0.037	Ca _{8,00} Fe _{6,16} Al _{1,84} O _{20,00}

Document History: (Bookmark 5)

Phase Andradite
Weight fraction/ % 0.8
Phase 1528612
Weight fraction/ % 13.0
Phase Sillimanite
Weight fraction/ % 22.1
Phase 2100188
Weight fraction/ % 60.6
Phase Brownmillerite
Weight fraction/ % 3.4



Sample ID	Rwp	Andradite [%]	1528612 [%]	Sillimanite [%]	2100188 [%]	Brownmillerite [%]
Riestra	2.2200	0.8	13.0	22.1	60.6	3.4

Рис. 2. Повний хімічний склад мінеральної суміші SM 0/40/70

Особливою характеристикою функціонування в бетонах очищених мінеральних класифікованих сумішей марки SM 0/40/70, які були виготовлені на основі спеціально перероблених золошлакових відвалів Ладжинської ТЕС у вібропресованих виробках, є такі фактори:

За рахунок значно зменшеного вмісту незгорілого вуглецю (до 2-3 %) суттєво збільшена активність мінеральної суміші в бетонах.

Досліджувана очищена та класифікована мінеральна суміш не містить негашеного вапна та оксиду магнію в результаті довготривалої витримки матеріалу в мокрому стані, що значно покращує адгезійні властивості компонента вібропресованої бетонної суміші.

За наявності в такій суміші частинок сферичної форми та ефективного

наповнення пор цей мінеральний очищений компонент у бетоні працює як свого роду мінеральний пластифікатор.

За відсутності в складі карбону досліджувана мінеральна суміш є однорідною та дрібнішою за гранулометричним складом (залишок на ситі у 45 мікрон не більше 12 %, яку повністю вилучають із підготовленого матеріалу).

Досліджений комплекс наведених вище властивостей суттєво підвищує гідравлічну активність такої суміші, що значно впливає на підвищення міцності вібропресованого дрібнозернистого бетону.

У табл. 3 подано основні технічні характеристики очищеної мінеральної класифікованої суміші марки SM 0/40/70 нового покоління із золошлакових відвалів Ладжинської ТЕС.

Таблиця 3

Технічні характеристики очищеної мінеральної класифікованої суміші марки SM 0/40/70

Номер	Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
1	Вологість	%	<0.5
2	Насипна щільність	т/м ³	1,4-1,7
3	Втрати з прожарюванням	%	<2,7

Результати проведених досліджень. Досвід використання на виробництві ТМ «Мій Двір» (м. Львів) очищеної мінеральної класифікованої суміші SM 0/40/70 як заміника портландцементу ПЦ-ІІ 500 А/Ш ПАТ «Івано-Франківськцемент» (до 20 % маси зв'язного) створює додаткові можливості для економії портландцементу, покращує реологічні властивості свіжовідформованих наджорстких дрібнозернистих і жорстких вібропресованих бетонів обох шарів будівельних (основного – нижнього шару та фактурного – верхнього шару) сумішей.

Свідченням такого факту є результати лабораторних випробувань, отримані сертифікованою вимірювальною лабораторією підприємства-виробника на основі цементно-піщаних балок 4x4x16 см з додаванням до 20 % мінеральних золошлакових сумішей із відвалів Бурштинської, Ладжинської та Добротвірської ТЕС (рис. 3), де на графіках і в табличній формі продемонстровано, як забезпечена необхідна міцність виробів на стиск на відповідному рівні. Економія витрат портландцементу як зв'язного при цьому коливається в межах від 12 до 17 %. Отже, дослідним шляхом було доведено

суттєву ефективність підготовлених активних мінеральних сумішей із золошлакових відвалів ТЕС нового

покоління у вібропресованих дрібнозернистих наджорстких бетонах.

Виробник портландцементу, марка	Фізико-механічні властивості портландцементу (міцність на стиск, МПа)	
	48 год	28 дів
ІФСЕМ ПЦ П/А-Ш 500Р-Н	23.06	50.02
ІФСЕМ ПЦ П/А-Ш 500Р-Н + Зола Бурштинська ТЕС (80%+20%)	16.35	41.12
ІФСЕМ ПЦ П/А-Ш 500Р-Н + мінеральна мука ТОВ "ЗКК" (80%+20%)	15.22	37.57
ІФСЕМ ПЦ П/А-Ш 500Р-Н + Зола Добротвірська ТЕС (80%+20%)	18.69	42.45

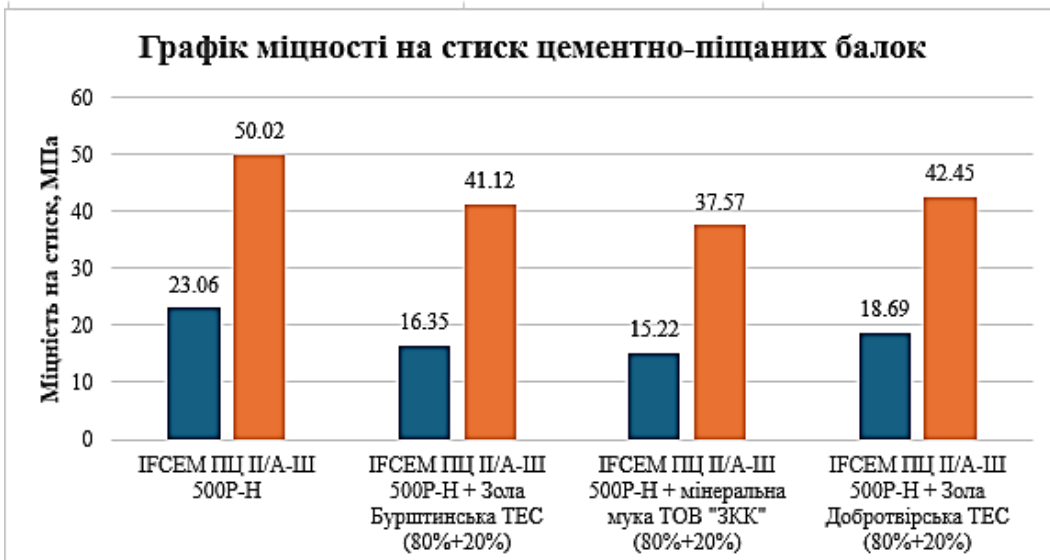


Рис. 3. Результати випробувань цементно-піщаних зразків із додаванням до зв'язного 20 % активної мінеральної золошлакової суміші

Висновки. У результаті здійснених у 2023-2024 роках досліджень ефективності застосування підготовлених і спеціально очищених і класифікованих мінеральних сумішей Ладижинської ТЕС (марки SM 0/40/70), Бурштинської і Добротвірської ТЕС, виготовлених в умовах виробничої бази ТМ «Мій Двір» (м. Львів), свідчать про відповідну ефективність їх застосування для серійного вібропресування наджорстких і жорстких дрібнозернистих бетонів на

сучасних бетоноформуєвальних комплексах імпорного виробництва (Німеччина).

Економічний ефект застосування активних мінеральних сумішей на основі перероблених (очищених і класифікованих) золошлакових відвалів теплових електростанцій становить у середньому до 15 % за рахунок економії портландцементу ПЦ П 500А/Ш, що в грошовому еквіваленті складає до 350-400 грн на кубічний метр бетонної суміші.

Список використаних джерел

1. Дворкін Л. Й. Ефективні золівмісні цементи, бетони та розчини: монографія. Рівне: НУВГП, 2022. 419 с.
2. Клапченко В., Краснянський Г., Азнаурян І., Кузнецова І. Використання золи теплоелектростанцій у виробництві бетону. *Збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі»*. Київ: КНУБА, 2018. Вип. 10. С. 47-52.
3. ДСТУ Б В.2.7-128:2006. Будівельні матеріали. Добавки активні мінеральні та добавки-наповнювачі до цементу. Технічні умови. Чинний від 01.01.2007. Київ: Мінбуд України, 2006. 12 с.
4. Звіт щодо проведення ситуації з золошлаковими відвалами на території Львівської та Івано-Франківської областей. Ч. 2. АЦ «Спільнота соціально-відновлювального бізнесу». Львів, 2015. 74 с.
5. Хлопицький О. О. Стан проблеми та перспектива переробки золошлакових відходів теплоелектростанцій України». *Scientific Journal «Science Rice»*. 2014. № 4(2). Р. 23-28.
6. Ковальський В. П., Сідлак О. С. Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах. *Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві»*. Вінниця, 2020. С. 35-40.
7. Кєсова Г. В., Кравчук Г. В. Перспективні заходи утилізації золошлакових відходів ТЕС. *Збірник наукових праць «Системний аналіз енергозберігаючих технологій та оптимізація енергоємних виробництв»*. Київ, 2018. № 52. С. 59-64.
8. Денисюк О. М., Нудченко Л. А., Токарчук В. В. Утилізація золошлакових відходів ТЕС в цементній промисловості. *Науковий огляд*. Київ, 2019. № 5(58). С. 79-88.
9. Дерев'яно В. М., Мосьпан В. І., Колохов В. В., Дзюбан О. В. Основні напрямки досліджень із використання золи ТЕС у виробництві будівельних матеріалів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 1(1007). С. 38-44.
10. Lichnov I., Kahanov V. Vibro-pressed Concrete in Ukraine: Problems, Trends and Prospects for Development. In *International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice-Rzeszów*. 2023. P. 224-231.
11. Lichnov I. S., Sanytsky M. A., Kahanov V. O. and Danyliuk V. I. Directions and development paths of vibro-pressing of products based on ultra-hard mixtures. *Збірник тез Міжнародної науково-технічної конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво»*. Одеса: ОДАБА, 2023. С. 15-18.
12. Lichnov I. S., Sanytsky M. A., Kahanov V. O., Danyliuk V. I. Optimization of the working compositions of fine-grained vibropressed concretes based on ultra-hard mixtures. *Збірник тез Міжнародної науково-технічної конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво»*. Одеса: ОДАБА, 2024. С. 79-82.

Лічнов Ігор Сергійович, аспірант кафедри будівельного виробництва, Національний університет «Львівська політехніка». ORCID iD: 0009-0004-7924-4274. Тел.: +38 (067) 670-02-36. E-mail: ihor.s.lichnov@lpnu.ua.

Саницький Мирослав Андрійович, доктор технічних наук, професор кафедри будівельного виробництва, Національний університет «Львівська політехніка». ORCID iD: 0000-0002-8609-6079. Тел.: +38 (067) 673-16-55. E-mail: msanytsky@ukr.net.

Каганов Вадим Оскарович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельного виробництва, Національний університет «Львівська політехніка». ORCID iD: 0000-0002-9607-2951. Тел.: +38 (067) 341-41-93. E-mail: kahanov@ukr.net.

Lichnov Ihor, postgraduate student, department of building construction, National University Lviv Polytechnic. ORCID iD: 0009-0004-7924-4274. Tel.: +38 (067) 670-02-36. E-mail: ihor.s.lichnov@lpnu.ua.

Sanytsky Myroslav, Doctor of Sciences, professor of the department of building construction, National University Lviv Polytechnic. ORCID iD: 0000-0002-8609-6079. Tel.: +38 (067) 673-16-55. E-mail: msanytsky@ukr.net.
Kahanov Vadym, Ph.D., associate professor of the department of building construction, National University Lviv Polytechnic. ORCID iD: 0000-0002-9607-2951. Tel.: +38 (067) 341-41-93. E-mail: kahanov@ukr.net.

Статтю прийнято 11.12.2024 р.

УДК 691.5

ПЕНЕТРАЦІЯ ХЛОРИД-ІОНІВ ІЗ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ У ЦЕМЕНТНІ МАТЕРІАЛИ

Д-р техн. наук О. С. Борзяк, асп. В. В. Журавель

PENETRATION OF CHLORIDE IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS INTO CEMENT MATERIALS

Dr. Sc. (Tech.) O. Borziak, PhD student V. Zhuravel

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320834>

***Анотація.** Основною проблемою корозії залізобетонних конструкцій є проникнення хлоридів, які руйнують пасивуючий шар сталеві арматури та сприяють її електрохімічній корозії. У статті досліджено процес проникнення хлорид-іонів у цементні матеріали. Метою роботи є аналіз впливу карбонатних добавок на глибину дифузії хлорид-іонів і міцність цементних композитів. Зразки цементно-піщаного розчину з різними типами цементу (портландцемент СЕМ I і цемент із карбонатними добавками СЕМ II) витримували у трьох середовищах: морській воді, 0,1 М розчині NaCl і проточній воді. Після семи днів витримки зразки з цементу СЕМ II показали вищу міцність на вигин, ніж зразки з СЕМ I. Проте після 28 днів міцність зразків СЕМ I стала вищою, незалежно від середовища. Зразки з СЕМ II демонстрували стабільну міцність у морській воді, тоді як у проточній воді та розчині NaCl міцність децю знижувалася. Дослідження глибини проникнення хлоридів показали, що зразки з карбонатними добавками (СЕМ II) мають більшу глибину дифузії хлоридів порівняно зі зразками з чистого портландцементу (СЕМ I). Це можна пояснити збільшенням капілярної пористості цементних композитів через введення карбонатів. У морській воді дифузія хлоридів була менш інтенсивною через присутність інших іонів, які можуть перешкоджати їх проникненню.*

Виявлено, що карбонатні добавки мають суперечливий вплив на властивості цементних композитів. З одного боку, вони сприяють зв'язуванню хлоридів у гідратні фази, а з іншого — збільшують проникність матеріалу через модифікацію порової структури.

***Ключові слова:** цементні матеріали, корозія арматури, пенетрація хлоридів, карбонатні добавки.*

***Abstract** The main problem of corrosion of reinforced concrete structures is the penetration of chlorides, which destroy the passivating layer of steel reinforcement and promote its electrochemical corrosion. This is especially relevant for hydraulic structures, transport infrastructure and other objects in contact with sea water or road reagents containing chlorides. The article examines the process of chloride ion penetration into cement materials. Analysis of preliminary studies showed that carbonate additives can both reduce chloride penetration by binding and increase it by changing*

the porosity of the cement structure. The aim of the work is to analyze the effect of carbonate additives on the depth of chloride ion diffusion and the strength of cement composites. Experimental studies were carried out on cement-sand mortars (cement: sand ratio - 1:3, water-cement ratio - 0.5). Cement-sand mortar specimens with different types of cement (Portland cement CEM I and cement with carbonate additives CEM II) were cured in three environments: seawater, 0.1 M NaCl solution and running water. Tests were carried out after 7 and 28 days to determine the compressive strength, flexural strength and chloride penetration depth.

After 7 days of curing, specimens with CEM II cement showed higher flexural strength than specimens with CEM I. However, after 28 days, the strength of CEM I specimens became higher regardless of the environment. CEM II specimens demonstrated stable strength in seawater, whereas in running water and NaCl solution, the strength slightly decreased.

Studies of the chloride penetration depth showed that specimens with carbonate additives (CEM II) have a greater chloride diffusion depth compared to specimens made of pure Portland cement (CEM I). This is explained by an increase in capillary porosity of cement composites due to the introduction of carbonates. In seawater, chloride diffusion was less intense due to the presence of other ions that could hinder their penetration.

It was found that carbonate additives have a contradictory effect on the properties of cement composites. On the one hand, they promote the binding of chlorides into hydrated phases, and on the other hand, they increase the permeability of the material through modification of the pore structure.

Cement with carbonate additives (CEM II) has a higher initial strength, but after 28 days it is inferior to cement without additives (CEM I).

Carbonate additives increase the permeability of concrete for chlorides due to modification of the pore structure.

Protection against chloride diffusion can be improved by using nanodispersed additives and optimizing the particle size distribution of cementitious materials.

Keywords: *cement materials, reinforcement corrosion, chloride penetration, carbonate additives.*

Вступ. Корозія є процесом руйнування матеріалів у результаті їхньої реакції з навколишнім середовищем і одним з основних факторів, що впливають на довговічність інженерних конструкцій. Однією з найважливіших переваг залізобетону порівняно з металами та іншими матеріалами є його висока корозійна стійкість. Бетон і залізобетон є довговічними матеріалами, якщо правильно підібраний склад композита, застосовані відповідна технологія виготовлення та ефективні захисні заходи.

Найбільш поширеними випадками корозійного пошкодження залізобетонних конструкцій є корозія сталевих арматур. Корозія сталі відбувається внаслідок впливу хлоридного середовища або в результаті карбонізації бетону, морозного руйнування бетону, у тому числі за посиленої

присутності солі, пошкодження бетону внаслідок капілярної абсорбції соляних розчинів і випаровування. Реальні умови експлуатації конструкції зазвичай пов'язані з наявністю декількох агресивних факторів.

Гідротехнічні морські споруди, такі як причали, хвилерізи, мости і бурові платформи, постійно зазнають впливу солоної води, багатої на хлориди, яка проникає в бетонні і сталеві елементи, викликаючи їх руйнування. Це явище сприяє значному скороченню терміну експлуатації таких об'єктів, що у свою чергу збільшує витрати на технічне обслуговування та ремонт.

Так само транспортні споруди, як і мости, віадуки та дороги, особливо ті, що використовують узимку, регулярно зазнають впливу дорожньої солі, яка містить хлориди. Використання протиожеледних

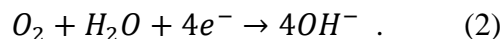
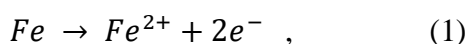
матеріалів, що містять хлориди, для доріг, хоч і є необхідним заходом для забезпечення транспортної безпеки, призводить до інтенсивної корозії елементів сталевих конструкцій, а також пошкодження бетонних поверхонь, що негативно позначається на довговічності всієї інфраструктури.

Розуміння механізмів хлоридної корозії та розроблення відповідних методів захисту є ключовим завданням у контексті їхньої довговічності та безпеки експлуатації.

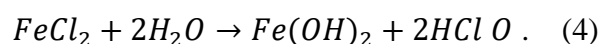
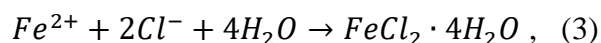
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хлориди в поєднанні з карбонізацією є двома основними факторами, які ініціюють депасивацію захисного шару арматури в залізобетоні, що призводить до її корозії [1]. Інфільтрація хлоридів є важливою причиною руйнування бетонних і залізобетонних конструкцій. Дія хлоридів викликає значні втрати арматури, пластичності, міцності арматурної сталі та контакту між сталлю і бетоном, а також зниження здатності розсіювати енергію через безперервне старіння та деградацію в корозійному середовищі протягом тривалого часу експлуатації. Цей вплив набагато сильніший у морському середовищі через інтенсивність вологості та концентрацію хлоридів у морській воді та повітрі.

Сталі для армування і попереднього напруження піддають корозії внаслідок карбонізації та впливу іонів хлоридів. Бетон є проникним матеріалом, де агресивні агенти шляхом дифузії (теоретично) досягають арматурної сталі, викликаючи її депасивацію і корозію, за наявності води і кисню [2].

Корозія сталі в бетоні має електрохімічну природу і складається з двох реакцій [3]. На аноді залізо вивільняє електрони та розчиняється у двовалентному стані. Ці електрони мігрують до катода, де відбувається відновлення кисню в присутності кисню:



Наявність у рідкій фазі бетону хлорид-іонів значно пришвидшує корозію арматурної сталі. Роль іонів хлориду в анодній і катодній реакціях показано в рівняннях нижче. Ці рівняння показують, що іони хлориду не беруть участі в реакції, але вони відіграють важливу роль, оскільки каталізують реакції корозії та діють як носії, що транспортують продукт корозії [4]:



Початок явища корозії пов'язаний з активністю хлоридів, які проникають глибоко в бетон, поки концентрація хлоридів не досягне арматурного стрижня і не перевищить порогове значення. Наявність іонів хлориду в залізобетоні викликає руйнування пасивуючого шару арматурних стрижнів, зниження рН порового розчину, оскільки знижується розчинність гідроксиду кальцію, підвищення вологості за рахунок абсорбційних властивостей солей у бетоні, підвищення електропровідності бетону.

Вільні іони хлориду в поровому розчині відповідають за початок і поширення корозії, тоді як зв'язані хлориди можна вважати нешкідливими.

Отже, одним із способів зменшення дифузії хлорид-іонів углиб бетону є їх зв'язування в стабільні продукти гідратації. У роботах [5, 6] розглянуто теоретичну можливість впливу зв'язування хлоридів на швидкість їх проникнення. Іони хлориду у звичлому цементному камені асоціюються з продуктами гідратації портландцементу і в такий спосіб змінюють його мінералогію. Як показано в роботі [7], транспорт хлоридів через цементні матеріали визначено явищами розчинення портландиту і осадження мінералів на основі хлоридів, а саме солей Фріделя та Куазеля.

У цементних системах тверді фази складаються переважно з портландиту і гелеподібної фази, гідрату силікату кальцію, позначеного як C-S-H. Оксид алюмінію поєднується з водою, кальцієм і сульфатом, утворюючи фази AFt і AFm. Цементні пасти містять приблизно 5-15 % (AFm+AFt).

Іони хлориду, які надходять у цементну систему через воду для замішування або з утилітарного середовища, витісняють сульфати з моносольфоалюмінату, утворюючи в такий спосіб сіль Кузеля за нижчих концентрацій хлориду та сіль Фріделя за вищих концентрацій. Вивільнені сульфат-іони реагують із кальцієм і алюмінієм. Це призводить до утворення еtringіту, який зазвичай викликає розширення об'єму, але також закриває пори. За наявності гідрокарбоалюмінатів хлорид-іони витісняють карбонат із монокарбоалюмінатної фази і в такий спосіб утворюють сіль Фріделя [7, 8].

Вивченню впливу карбонатних домішок на зв'язування іонів хлору в цементних системах присвячені роботи [8-11]. Ці дослідження підтверджують, що системи, які містять карбонати, мають підвищену здатність зв'язувати хлориди. Карбонати гальмують потенційно експансивні реакції проникнення хлориду, але водночас знижують загальну здатність зв'язувати хлориди та збільшують співвідношення Cl^-/OH^- у воді [7].

У різних літературних джерелах є суперечливі відомості про вплив карбонатних добавок на проникнення хлоридів у бетон.

Карбонати часто використовують як компонент бетону. Одним із них є вапняковий пил, який походить переважно із заповнювачів, отриманих із осадочних гірських порід. Він служить заміною дрібного заповнювача [12]. Випробування, проведені на проникнення іонів хлориду в бетон із використанням вапнякового пилу, показують, що чим більше вапнякового порошку в бетоні, тим швидше в нього

проникають іони хлориду. Вапняковий порошок збільшує вміст капілярних пор, що є основним фактором, який впливає на швидкість дифузії хлорид-іонів у бетоні [12].

Інші ж дослідження [17] показали, що проникнення іонів хлориду в бетон значно знижується за використання мінеральних добавок, зокрема карбонатів кальцію.

У зв'язку з тим, що дані про вплив карбонатів на проникнення хлоридів суперечливі, доцільним є проведення експериментальних досліджень впливу мінерального складу цементу, а саме наявності карбонатних мінеральних добавок на глибину penetрації хлорид-іонів у цементні композити.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета роботи – дослідження впливу карбонатних добавок на глибину дифузії хлорид-іонів і міцність цементних композитів. Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання: розроблення методики експериментальних досліджень; виготовлення зразків цементних композитів із використанням двох типів цементів – портландцементу СЕМ I 42.5R і портландцементу з добавкою вапняку СЕМ II/A-LL 42.5; визначення міцності на вигин і стиск і визначення глибини проникнення хлорид-іонів зразків цементних композитів, витриманих у середовищах із різною концентрацією хлоридів; аналіз отриманих результатів дослідження.

Основна частина дослідження. У дослідженні використовували два типи цементів:

- портландцемент без добавок за стандартом EN 197-1 СЕМ I 42.5 R, позначений як СЕМ I;

- портландцемент із добавкою вапняку за стандартом PN-B 19707 СЕМ II/A-LL 42.5 R-NA, позначений як СЕМ II.

Досліджуваним матеріалом є цементно-піщані розчини, рецептура приготування яких відповідає EN 196-1 [13] у таких пропорціях: цемент : пісок – 1 : 3; В/Ц – 0,5.

Для проведення подальших випробувань міцності на згин і стиск і перевірки глибини проникнення хлорид-іонів були виготовлені зразки-балочки розмірами 40x40x160 мм відповідно до рекомендацій стандарту EN 196-1.

У зв'язку з тим, що залізобетонні конструкції використовують у різних типах середовищ, а одним з основних факторів, що руйнують ці конструкції, є корозія арматурної сталі, викликана хлоридами, зразки були поміщені для витримки в середовищах із різною концентрацією хлоридів.

Лабораторні випробування конструкцій, що використовують у морських умовах, часто проводять із використанням розчинів NaCl для наближення до морських умов. Однак морська вода, крім хлоридів натрію, також містить інші іони, такі як сульфати, карбонати і магній, які можуть впливати на проникнення хлоридів. Тому для порівняння як одне середовище була використана морська вода з Балтійського моря. Середня солоність прибережних вод Балтійського моря [NaCl] становить близько 5,1 г/дм³, що за молярної маси 58,5 г/моль

відповідає молярній концентрації 0,1 М [14-15].

Друге середовище, створене для зразків, було середовищем із подібними умовами солоності з використанням кристалічної солі з чистотою 95%. Концентрація цього розчину становила 0,1 М [15].

Третім середовищем, у якому витримували зразки, було вибрано звичайну проточну воду, щоб виключити присутність у цій воді хлоридів і порівняти фізичні властивості зразків.

Дослідження проводили у два етапи через 7 і 28 днів. На кожній стадії тестували три зразки, що містять певний цемент, і з кожного середовища, у якому вони були витримані.

Визначення міцності на вигин і стиск зразків проводили відповідно до стандартів EN 196-1:2016-07 за допомогою випробувальної машини Walter + bai (Löhnigen, Швейцарія).

На рис. 1 і 2 наведено результати визначення міцності на вигин і стиск зразків цементно-піщаного розчину, витриманих у проточній і морській воді та розчині хлориду натрію.

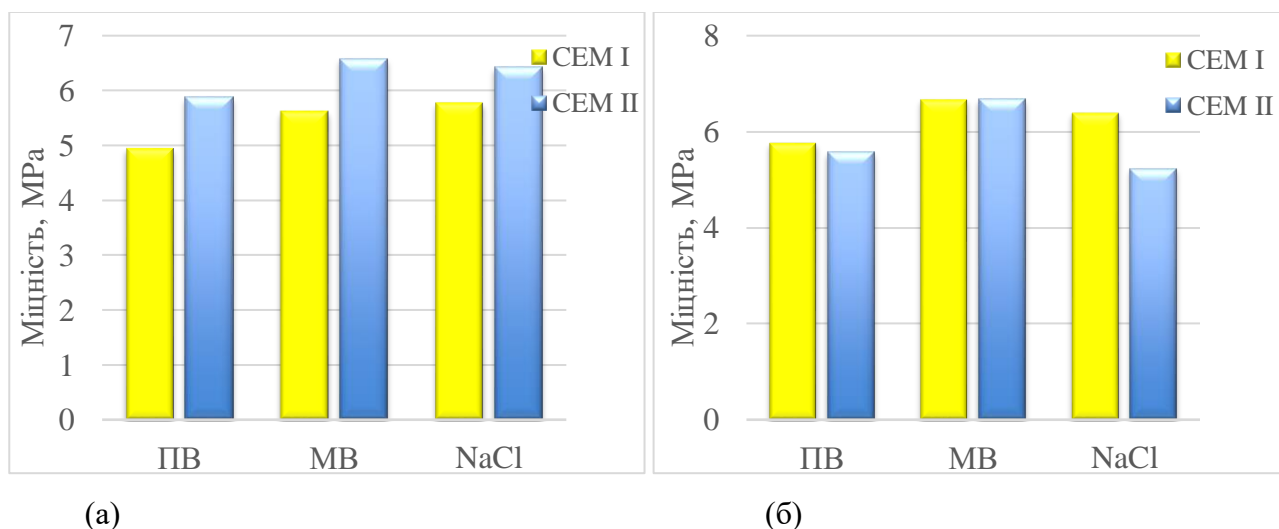
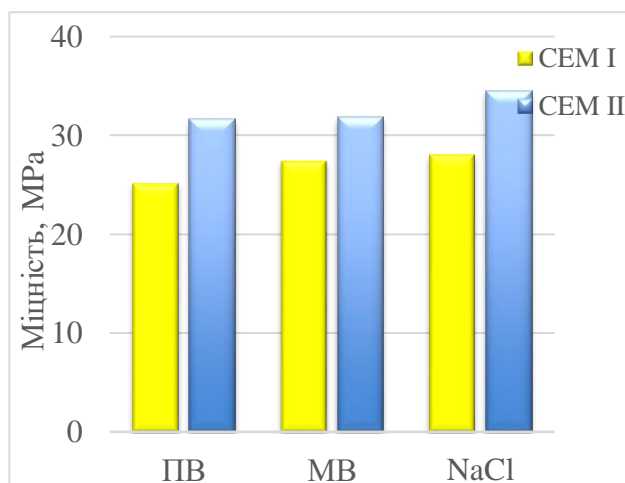
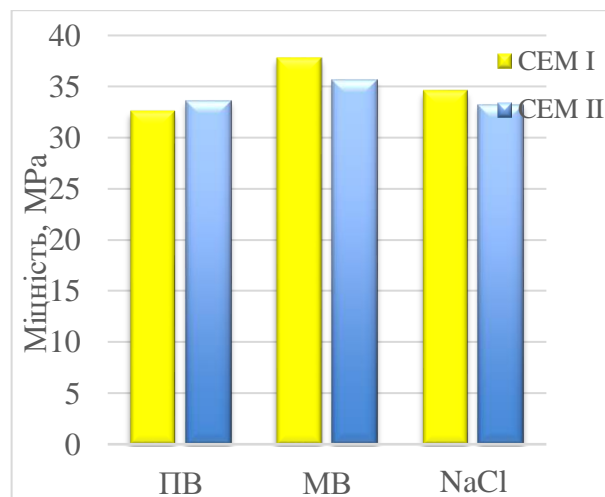


Рис. 1. Міцність на вигин зразків цементно-піщаного розчину у віці 7 (а) і 28 (б) діб, які витримували у проточній (ПВ) і морській (МВ) воді та розчині хлориду натрію (NaCl)



(а)



(б)

Рис. 2. Міцність на стиск зразків цементно-піщаного розчину у віці 7 (а) і 28 (б) діб, які витримували у проточній (ПВ) і морській (МВ) воді та розчині хлориду натрію (NaCl)

Аналізуючи результати, можна зробити висновок, що після 7 днів у кожному середовищі для зразків із СЕМ II характерна вища міцність на вигин, ніж для зразків із СЕМ I. Однак через 28 днів тенденція є абсолютно протилежною. Міцність на вигин зразків СЕМ I закономірно змінюється з часом, незалежно від умов витримки. Міцність на вигин зразків СЕМ II після 28 діб витримки в морській воді практично не змінилася порівняно з міцністю через сім діб, а в простій воді та 0,1 М розчині солі навіть знизилася.

Подібно до міцності на вигин, міцність на стиск зразків СЕМ I закономірно змінюється з часом, незалежно від умов твердіння. У всіх рідких середовищах зразки з СЕМ II у віці семи днів, мають вищу міцність, ніж зразки з СЕМ I.

Загалом за даними випробувань встановлено, що карбонатні добавки знижують міцність цементно-піщаного розчину відносно міцності зразків без добавок. Зразки, які були піддані впливу розчину солі, мають вищу міцність на вигин порівняно зі зразками у воді.

Однак, як відомо, хлориди насправді не істотно впливають на міцність цементних

композитів. Іони хлору набагато небезпечніші для арматурної сталі. Тому дослідження глибини проникнення іонів хлору вглиб цементно-піщаних розчинів є більш важливими.

Метод визначення глибини проникнення хлоридів углиб матеріалу заснований на осадженні хлор-іонів 0,025 н. водним розчином нітрату срібла (AgNO_3) [16]. Глибина проникнення хлоридів – це товщина шару розчину, на якому утворився світлий наліт. Для дослідження глибини дифузії іонів хлору зразки розколювали, а на відколену поверхню наносили водний розчин нітрату срібла. Випробування проводили після 7 і 28 витримок зразків у середовищах. Результати є середнім арифметичним вимірювання глибини проникнення хлоридів у двох напрямках. На рис. 3 подано результати дослідження глибини penetрації хлорид-іонів вглиб зразків цементно-піщаного розчину.

У середовищі з концентрацією 0,1 М проникнення відбувається набагато швидше через сім днів, ніж у морському середовищі. Можливо, це пов'язано з тим, що морська вода містить сполуки, які перешкоджають дифузії хлоридів у бетон.

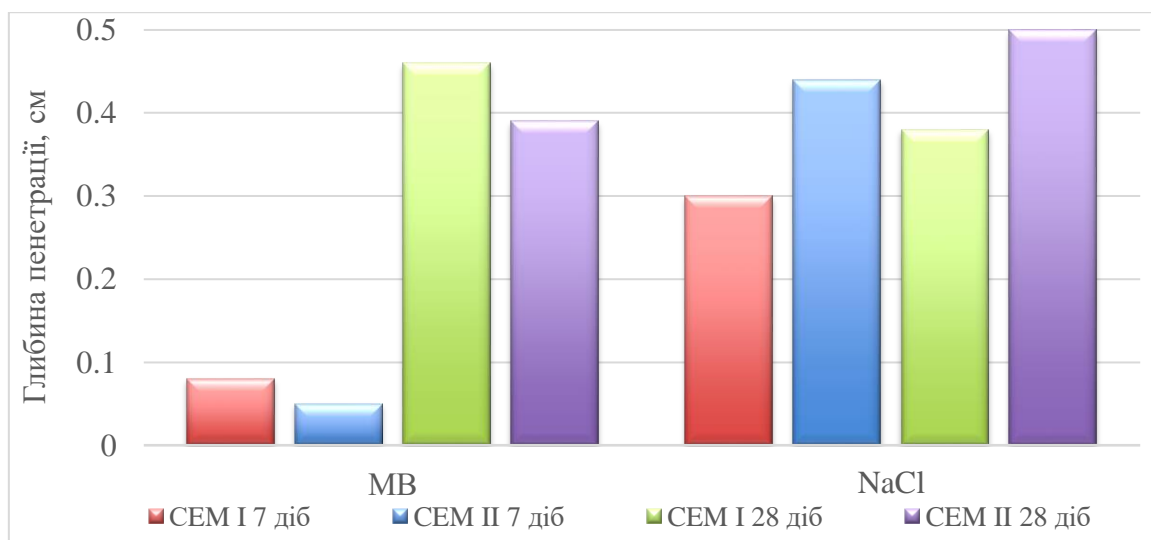


Рис. 3. Глибина penetрації хлорид-іонів вглиб зразків цементно-піщаного розчину у віці 7 і 28 діб, які витримували в морській воді (MB) і розчині хлориду натрію (NaCl)

За результатами дослідження, глибина проникнення іонів хлору збільшується з додаванням карбонатних добавок. Ці результати не збігаються з попередніми теоретичними припущеннями. Подібні результати отримані в роботі [12]. Такий вплив карбонатів на глибину дифузії хлоридів у роботах [12, 17] пояснюють перерозподілом розмірів пор. Отже, глибина дифузії хлоридів насамперед визначена формою і розміром пор. Більш ефективним у захисті від проникнення агресивного середовища буде реалізація підходу, заснованого на оптимізації гранулометричного складу компонентів цементної композиції.

Висновки. Результати досліджень показали, що мінеральний склад цементу і хімічний склад середовища, у якому зберігали зразки, впливають на міцнісні властивості цементно-піщаних розчинів і глибину проникнення хлорид-іонів. Після семи днів твердіння зразки цементно-піщаного розчину на основі портландцементу з добавкою вапняку показали значно більшу міцність порівняно зі зразками на основі портландцементу без

добавок. Це узгоджується з літературними даними про можливість утворення кристалічних продуктів гідратації на ранніх стадіях, так званих фаз AfT і AFm.

Як показали дослідження, заміна частини в'язучого на карбонатні добавки без урахування їхньої дисперсності не знижує проникність бетону для іонів хлориду.

Дифузія іонів хлору відбувається через систему пор і капілярів. Для цементних композитів із підвищеною пористістю запропонований вміст карбонатних добавок недостатній для зв'язування великої кількості хлорид-іонів у стабільні продукти гідратації. Цементні композити зі зниженою проникністю для агресивних середовищ повинні мати структуру, оптимізовану шляхом варіювання гранулометричного складу та електричних властивостей поверхні компонентів. Заплановано подальше проведення досліджень щодо модифікації структури цементних композитів нанодисперсними добавками. Введення в такі композити карбонатних добавок буде ефективним захистом від дифузії хлорид-іонів.

Список використаних джерел

1. Agboola O., Kupolati K. W., Fayomi O. S. I. A Review on Corrosion in Concrete Structure: Inhibiting Admixtures and Their Compatibility in Concrete. *J Bio Tribo Corros.* 2022, **8**, 25. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00624-2>.
2. Vaysburd A. M., Emmons P. H. How to make today's repairs durable for tomorrow — corrosion protection in concrete repair. *Construction and Building Materials.* 2000, Vol. 14, Issue 4, 189-197. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00022-2).
3. Broomfield J. P. (2023). Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003223016>.
4. Neville A. Chloride attack of reinforced concrete: an overview. *Materials and Structures.* 1995, **28**, 63–70. <https://doi.org/10.1007/BF02473172>.
5. Glass G. K., Buenfeld N. R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science.* 2000, **42(2)**, 329–344. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X97000097?via%3Dihub>.
6. De Weerd K. Chloride binding in concrete: recent investigations and recognised knowledge gaps: RILEM Robert L'Hermite Medal Paper. *Mater Struct.* 2021, **54**, 214. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01793-9>.
7. Cherif R., El Almine Hamami A., Ait-Mokhtar A., Bosschaerts W., Thermodynamic equilibria-based modelling of reactive chloride transport in blended cementitious materials. *Cement and Concrete Research.* 2022, **156**, 106770. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106770>.
8. Balonis M., Lothenbach B., Le Saout G., Glasser F. P. Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems. *Cement and Concrete Research.* 2010, Tom 40, Numer 7, 1009-1022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461000058X?via%3Dihub>.
9. Zhijian Chen and Hailong Ye. Influence of metakaolin and limestone on chloride binding of slag activated by mixed magnesium oxide and sodium hydroxide. *Cem. and Concr. Compos.* 2022, **127**, 104397. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104397>.
10. Chepurna S., Borziak O., Zubenko S. Concretes, Modified by the Addition of High-Diffused Chalk, for Small Architectural Forms. *MSF.* 2019, **968**, 82–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.82>.
11. Borziak O., Zhuravel V., Hudymenko M. The influence of chloride ion diffusion on the structure of cement composites containing carbonate additives. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2024, **1376**, 012023. DOI 10.1088/1755-1315/1376/1/012023.
12. Kępnia M., Woyciechowski P., Łukowski P., Kuziak J., Kobyłka R. The Durability of Concrete Modified by Waste Limestone Powder in the Chemically Aggressive Environment. *Materials.* 2019, **12**, 1693. <https://doi.org/10.3390/ma12101693>.
13. ДСТУ EN 196-1:2007. Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2005, IDT)
14. Borowski T., Hryniewicz T. Spadek zasolenia Morza Bałtyckiego jako naturalne zjawisko. *Rocznik Ochrona Srodowiska.* 2004, 223-232.
15. De Weerd K., Lothenbach B., Geiker M. R. Comparing chloride ingress from seawater and NaCl solution in Portland cement mortar. *Cement and Concrete Research.* 2019. Vol. 115. P. 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.014>.
16. Real L. V., Oliviera D. R. B., Soares T., Medeiros M. H. F. AgNO₃ spray method for measurement of chloride penetration: the state of art. *Rev. ALCONPAT [online].* 2015, Vol. 5, n. 2. P. 151-161. <https://doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>.

17. Ngala V. T. and Page C. L. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. *Cem. and Concr. Res.* 1997, **27(7)**, 995–1007. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884697001026>.

Борзяк Ольга Сергіївна, доктор технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936.

E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Журавель Віталій Вікторович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1348-6631.

E-mail: 1987robota@gmail.com.

Borziak Olga, Dr. Sc. (Tech.), associate professor, Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Zhuravel Vitalii, postgraduate student, Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1348-6631. E-mail: 1987robota@gmail.com.

Статтю прийнято 11.12.2024 р.

УДК 691.328

КІНЕТИКА КАРБОНІЗАЦІЇ ЗАХИСНОГО ШАРУ БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОПОР КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЦЬ

Аспіранти Е. Ф. Наджафов, Є Чженьхуа, доктори техн. наук Д. А. Плугін, А. А. Плугін

KINETICS OF CARBONIZATION OF THE PROTECTIVE LAYER OF CONCRETE OF REINFORCED CONCRETE POLES OF RAILWAY CONTACT NETWORK

PhD student E. F. Najafov, PhD student Ye Zhenhua,
Dr. Sc. (Tech.) D. A. Plugin, Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320835>

Анотація. Досліджено вплив карбонізації захисного шару бетону, що спричиняє втрату бетоном захисних властивостей до сталевій арматури, на довговічність опор. Виконано аналіз впливу конструктивних особливостей і технологічних факторів на характеристики захисного шару бетону опор контактної мережі, термодинамічний аналіз реакції нейтралізації продуктів гідратації цементу вуглекислим газом, теоретичний аналіз процесу карбонізації та кінетики просування її фронту, експериментальне дослідження кінетики карбонізації. Встановлено, що нейтралізація бетону вуглекислим газом відбувається через розчинення молекул CO₂, а кінетика просування фронту карбонізації визначається дифузійною швидкістю цих молекул через поровий простір бетону. Запропоновано рівняння кінетики карбонізації. Показано, що реакційна здатність бетону для карбонізації визначена водопоглинанням бетону. Визначено величини ефективного коефіцієнта дифузії CO₂ в бетоні опор, отримано кінетичні залежності просування фронту карбонізації.

Ключові слова: залізобетонна опора контактної мережі залізниці, центрифугований бетон, довговічність, вуглекислий газ, гідроксид кальцію, карбонізація, дифузія.

Abstract. Reinforced concrete conical centrifuged poles of the contact network are widespread on electrified railways. In addition to electrocorrosion of the underground part of the supports on electrified sections with direct current, the above-ground part of the supports is also damaged. The influence of carbonization of the protective layer of concrete, which causes the loss of concrete protective properties to steel reinforcement, on the durability of the supports has been studied. An analysis of the influence of design features and technological factors on the characteristics of the protective layer of concrete supports of the contact network has been performed, a thermodynamic analysis of the reaction of neutralization of cement hydration products by carbon dioxide, a theoretical analysis of the carbonization process and the kinetics of its front advancement, and an experimental study of the kinetics of carbonization have been performed. It has been established that centrifugation provides high density of concrete and very slow carbonization. However, due to structural and technological features, a significant number of operated supports have an insufficient thickness of the protective layer. As a result of thermodynamic analysis, it was established that the neutralization of concrete with carbon dioxide occurs through the dissolution of CO_2 molecules, and the kinetics of the carbonation front advancement is determined by the diffusion of these molecules through the pore space of concrete. Equations of carbonation kinetics based on Fick's law are proposed. It is shown that the reactivity of concrete for carbonation is determined by the volume of pores accessible to water and, consequently, by the water absorption of concrete, a new equation is proposed for its determination. As a result of experimental studies of carbonation kinetics, the values of the effective diffusion coefficient of CO_2 in the concrete of the supports were determined, and the kinetic dependences of the carbonation front advancement were obtained. As a result of statistical analysis, it was established that the most influential factor determining the durability of the supports of the contact network is the thickness of the protective layer. The minimum thickness of the protective layer is established, which is guaranteed to provide a standardized service life of the supports of 50 years.

Keywords: reinforced concrete poles of the railway contact network, centrifuged concrete, durability, carbon dioxide, calcium hydroxide, carbonization, diffusion.

Вступ. Масова електрифікація залізниць у світі почалася в 1950-х рр. На електрифікованих залізницях одним із розповсюджених типів опорних конструкцій контактної мережі стали залізобетонні конічні центрифуговані опори. Відомо, що на ділянках, електрифікованих постійним струмом, вони зазнають інтенсивного електрокорозійного впливу з пошкодженням переважно сталевих арматурних їхньої підземної частини. Великий досвід експлуатації опор дав змогу мінімізувати цей вплив за допомогою ізоляції підземної частини, комбінованого армування попередньо-напруженим високоміщним дротом і ненапруженою стрижневою арматурою, ізолюючими деталями. Проте пошкодження різного характеру зазнає і надземна частина опор.

Одним із розповсюджених типів пошкоджень залізобетонних конструкцій, які знижують їхню довговічність, є корозія арматури внаслідок карбонізації (нейтралізації) захисного шару бетону. Переважно таких пошкоджень зазнають конструкції з бетону невисокої щільності. Проте, незважаючи на високу щільність бетону центрифугованих опор, у них також зазначали такі пошкодження. Тому дослідження кінетики карбонізації бетону опор контактної мережі є актуальним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню їхньої надійності, довговічності та ресурсу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш руйнівним фактором для залізобетонних опор контактної мережі залізниць є вплив струмів витоку в разі

електрифікації постійним струмом. Ці струми стікають із рейок через групове заземлення опор на рейки і спричиняють електрокорозію підземної частини опор, яка і визначатиме їхній фактичний термін служби [1]. Електрокорозійні процеси відбуваються і на ділянках змінного струму, проте їхня інтенсивність порівняно з постійним струмом набагато менша [2]. Проте в залізобетонних опорах контактної мережі за період їх використання спостерігали також корозію арматури надземної частини внаслідок карбонізації захисного шару бетону через його недостатню щільність [3], товщину захисного шару [4].

Карбонізація полягає в нейтралізації гідроксиду кальцію цементного каменю вуглекислим газом повітря, внаслідок чого рН порового електроліту цементного каменю знижується з 12,5 до 9 і менше та він припиняє пасивувати сталеву арматуру, яка одразу зазнає корозії [5]. Нейтралізація здійснюється й іншими кислими газами – сірчанам ангідридом, оксидами азоту. У роботі [3] зазначено умовність терміна «газова корозія» відносно бетону – за суттю елементарних процесів корозія бетону в газових середовищах не відрізняється від корозії в рідинах, оскільки хімічні реакції між кислими газами та мінералами цементного каменю протікають у плівках вологи. Газ має розчинитися до того, як вступати в реакцію з іншою розчищеною речовиною. Визначальний вплив на кінетику і ступінь руйнівних процесів мають структура та поровий простір бетону. Саме поровий простір визначає проникність бетону для агресивних речовин, а проникність залежить не стільки від сумарної (загальної) пористості, скільки від розподілу пор за розмірами (диференційної пористості).

Існують різні класифікації пор, які часто залежать від способу їх визначення [6]. Пори є в цементному камені, заповнювачах і контактні – на границі розподілу між ними. За походженням є пори

гелю, контракційні від зменшення сумарного об'єму цементу і води після гідратації, капілярні від надлишку води замішування, повітряні від залучення повітря (звичайно замкнені сферичні), седиментаційні від зовнішнього та внутрішнього водовідділення. Упродовж експлуатації утворюються усадочні, температурні тріщини, пори вилуговування, пори й тріщини від інших видів корозії. Усадочними дефектами є поверхні розподілу між «кластерами» – агрегатами частинок у мікроструктурі бетону [7]. Залежно від співвідношення розмірів пор і товщини адсорбційних шарів на їхніх стінках, а також рушійних сил переміщення води в них пори класифікують на гелеві (ефективний радіус до 15 Å), мікрокапіляри (до 0,1 мкм), макрокапіляри (0,1–10 мкм), некапілярні пори. Уважають, що гелеві пори та мікрокапіляри практично недоступні для води. У макрокапілярах рух води відбувається під дією капілярних сил. Некапілярні пори заповнюються рідкою фазою тільки під гідростатичним тиском.

Перенесення газу, рідини, розчинених речовин крізь поровий простір бетону може здійснюватися під дією градієнтів: тиску (фільтрація); температури (конвекція); концентрації (дифузія, осмос); вологості; електричного потенціалу. Фактично перенесення здійснюється за складним змішаним механізмом, характер якого визначається переважним розміром пор [8], тому кінетику карбонізації визначають за рівнянням Фіка, у якому коефіцієнт дифузії заміняють емпіричним ефективним коефіцієнтом дифузії та вводять до рівняння емпіричну величину реакційної здатності бетону [9].

Існує припущення, що водопоглинання бетону достатньо точно характеризує поровий простір бетону саме щодо його проникності для газів, рідин та іонів [10]. Для вирішення практичних завдань такий підхід здається найбільш продуктивним.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є встановлення кінетики нейтралізації захисного шару бетону залізобетонних опор контактної мережі для прогнозування їхньої довговічності. Для досягнення мети висунуто такі завдання досліджень: аналіз впливу конструктивних особливостей і технологічних факторів на характеристики захисного шару бетону опор контактної мережі; термодинамічний аналіз реакції нейтралізації продуктів гідратації цементу вуглекислим газом; теоретичний аналіз

процесу карбонізації та кінетики просування її фронту; експериментальне дослідження кінетики карбонізації.

Методи досліджень. Можливість протікання реакцій карбонізації оцінювали термодинамічним аналізом за величинами їхньої вільної енергії Гіббса ΔG^0 і константи рівноваги K [11]. Вихідні дані для аналізу – термодинамічні константи за стандартних умов реагентів і продуктів припущених реакцій прийняті за роботою [12] і наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Стандартні значення вільної енергії Гіббса ΔG^0_{298} утворення сполук із елементів

Сполуки, іони	ΔG^0_{298} , кДж/моль	Сполуки, іони	ΔG^0_{298} , кДж/моль
$CO_{2газ}$	-394,36	$CO_3^{2-}_{aq}$	-527,9
$Ca(OH)_{2тв}$	-562,5	$HCO_3^{-}_{aq}$	-586,77
$CaCO_{3тв}$	-1128,8	H^+_{aq}	0
$H_2O_{рід}$	-237,13	OH^{-}_{aq}	-157,2

Вільну енергію Гіббса ΔG^0 реакцій за стандартних умов (25 °С) визначали за формулою, кДж/моль,

$$\Delta G^0 = \sum \Delta G^0_{\text{продуктів}} - \sum \Delta G^0_{\text{реагентів}}. \quad (1)$$

Константу рівноваги реакції визначали за формулою

$$K = \exp(-\Delta G^0/RT). \quad (2)$$

Рівняння рівноваги складалося як відношення добутку концентрацій продуктів $\Pi[\text{продукти}]$ у ступенях їхніх стехіометричних коефіцієнтів n до добутку концентрацій реагентів $\Pi[\text{реагенти}]$ у ступенях їхніх стехіометричних коефіцієнтів m :

$$\Pi[\text{продукти}]^n / \Pi[\text{реагенти}]^m = K, \quad (3)$$

де для твердих речовин концентрації дорівнюють 1, іонів у розчині – їхній концентрації, моль/л, газів – їхньому парціальному тиску P .

Можливість довільного протікання реакцій оцінюють так: у разі негативного значення ΔG^0 реакція протікає довільно, у разі позитивного значення ΔG^0 – довільно не протікає; у разі $K > 1$ реакція зміщена в бік продуктів і протікає довільно, у разі $K < 1$ реакція зміщена в бік реагентів і довільно не протікає. За рівнянням рівноваги визначали продукти і реагенти, концентрації яких обмежують протікання реакцій.

Товщину захисного шару бетону в польових умовах вимірювали неруйнівним методом за допомогою приладів ИСЗ-10Н [4] і Hilti PS 50 [13], а також прямими вимірюваннями в пробитих отворах (рис. 1). Глибину карбонізації бетону опор після їхньої тривалої експлуатації визначали на бічних поверхнях пробитих отворів, для чого на ці поверхні наносили розчин

фенолфталеїну 0,1 % в етиловому спирті та вимірювали товщину незабарвленого

(нейтралізованого) шару.

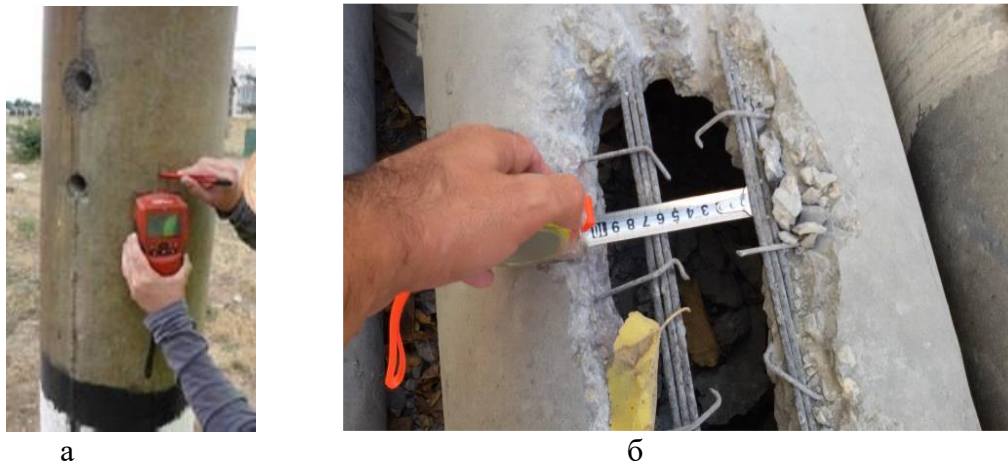


Рис. 1. Визначення товщини захисного шару бетону опор контактної мережі в польових умовах [13]: а – неруйнівним методом за допомогою приладу Hilti PS 50; б – прямими вимірюваннями в пробитих отворах

Для експериментального дослідження кінетики карбонізації з чотирьох опор контактної мережі кільцевим свердлом із водяним охолодженням вибурювали циліндричні керни діаметром 60 мм, висотою 60 мм (відповідає товщині стінки). Керни розділяли на 18 зразків, за якими визначали водопоглинання за ДСТУ Б В.2.7-170. Показники, які визначають кінетику карбонізації – ефективний коефіцієнт дифузії D' та реакційну здатність бетону m_0 ,

досліджували за методикою [9] на трьох зразках, що мали мінімальне, максимальне та найближче до середнього значення водопоглинання. Зразки у вигляді кубів із розміром ребра 40 мм вирізали на каменерізальному верстаті під водяним охолодженням. Дифузійну проникність визначали прискореним способом за допомогою лабораторної установки, наведеної на рис. 2.

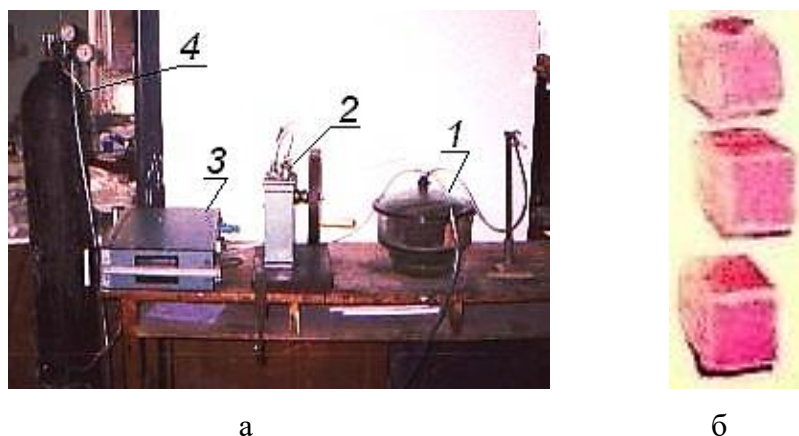


Рис. 2. Дослідження дифузійної проникності бетону для CO_2 : а – лабораторна установка; б – зрізи зразків, що піддали прискореному випробуванню:

- 1 – камера з підвищеним вмістом CO_2 для експозиції зразків;
 2 – лабораторний вакуумний насос; 3 – газоаналізатор ГИАМ-14;
 4 – балон із CO_2 , оснащений газовим редуктором

Зразки витримували в камері з відносною вологістю повітря 75 ± 3 % за температури $+20 \pm 5$ °С до встановлення постійної маси. Зразки поміщували в камеру установки, із якої за допомогою вакуумного насоса відкачували повітря, після чого за допомогою газового редуктора подавали вуглекислий газ CO_2 до досягнення концентрації 10 ± 5 % за об'ємом. Концентрацію CO_2 контролювали за допомогою газоаналізатора ГИАМ-14 упродовж усієї експозиції зразків. Зразки витримували в камері впродовж семи діб, підтримуючи зазначену концентрацію CO_2 і температуру $+20 \pm 5$ °С. Після експозиції зразки розколювали, на поверхні відколу наносили розчин фенолфталеїну 0,1 % в етиловому спирті та за допомогою відлікового мікроскопа вимірювали товщину x_0 незабарвленого (нейтралізованого) шару від поверхні зразка до його границі із забарвленим у малиновий колір шаром. Результати вимірювань піддавали статистичній обробці.

Ефективний коефіцієнт дифузії CO_2 у бетоні D' розраховували за формулою [9]

$$D' = \frac{m_0 x_0^2}{2c_0 \tau_0} = 8,2672 \cdot 10^{-6} \cdot m_0 x_0^2, \text{ см}^2/\text{г}, \quad (4)$$

де x_0 – глибина карбонізації, см;
 c_0 – концентрація вуглекислого газу в камері, 10 % або $0,1 \text{ см}^3/\text{см}^3$;
 τ_0 – тривалість карбонізації,
 7 діб = $6,048 \times 10^5$ с;
 m_0 – реакційна ємність бетону,

$$m_0 = \frac{0,4Цpf}{\rho_{CO_2}} = 72,8376 \cdot Ц, \text{ см}^2/\text{см}^2, \quad (5)$$

де $Ц$ – вміст цементу в бетоні, г/см³;
 p – вміст СаО у цементі, відн. од., для бездобавочного цементу прийнято 0,6;
 f – частка СаО, що бере участь у

карбонізації, прийнято 0,6;
 ρ_{CO_2} – густина CO_2 , $0,001977 \text{ г}/\text{см}^3$.

Основна частина дослідження.
Аналіз впливу конструктивних особливостей і технологічних факторів на характеристики захисного шару бетону опор контактної мережі. На залізницях пострадянських країн перша електрифікація була здійснена у 1926 р. на ділянці Баку – Сабунчі (Азербайджан), де на перегонах були встановлені дерев'яні опори контактної мережі. На початку масової електрифікації (1955–56 рр.) на перегонах спочатку встановлювали металеві ґратчасті опори. Їх встановлювали в котловани, які заповнювали бетоном. Але такі опори були визнані надто металомісткими, тому замість них швидко почали застосовувати залізобетонні опори. Перші залізобетонні опори типу ЖБД були двотавровими з отворами в стінці для полегшення. Їх виготовляли без попереднього напруження арматури з бетону, який ущільнювали вібрацією [1, 3]. Захисний шар такого бетону швидко зазнавав карбонізації і втрачав захисні властивості до арматури, яка швидко кородувала, тому довговічність опор виявилася недостатньою. Майже одночасно з опорами ЖБД почалося виробництво і встановлення залізобетонних конічних трубчастих центрифугованих опор типу ЖБК. Вершини опор після розпалублення забивали заглушкою з бетонної суміші, ущільненої штикуванням. Центрифугований бетон за рахунок відтиснення зайвої води та зниження В/Ц мав більшу міцність і щільність, ніж вібрований бетон опор ЖБД, тому нейтралізація захисного шару та корозія арматури через неї уповільнилася. Але впровадження центрифугованого бетону не вирішило повністю проблему недостатньої довговічності опор. У надземній частині центрифугованих опор більш пізніх конструкцій досі продовжують виявляти

тріщини від корозії подовжньої арматури (рис. 3), зокрема через нейтралізацію захисного шару бетону.

Крім того, опори ЖБК виготовляли з ненапруженим каркасом із стрижневої арматури, тому вони були схильні до утворення поперечних тріщин від згинального моменту, корозія арматури відбувалася у тріщинах і їхня довговічність також виявилася недостатньою. З 1957 р. почали виготовляти центрифуговані опори з попередньо напруженою подовжньою

арматурою спочатку стрижневою $\varnothing 6$ і $\varnothing 12$ мм, потім із високоміцного вуглецевого дроту $\varnothing 5$ мм, поперечною спіральною арматурою з холоднотягнутого дроту $\varnothing 3$ мм, що дало змогу усунути поперечні тріщини. Ця конструкція з деякими змінами є основною дотепер. У серіях робочих креслень у подальшому позначення типу опор послідовно змінювалося: УЖБК, ГК, СЖБК, СК, СКУ, СКЦ, С, СС [1, 3].



Рис. 3. Подовжні тріщини в опорах від корозії подовжньої арматури

У попередньо напружених опорах поперечні тріщини були усунуті, проте в їхній верхній частині одразу після передавання натягу арматури з форми на бетон почали утворюватися подовжні тріщини. У наступних типах опор у верхній частині передбачили підсилювальні кільця зі стрижневої арматури або згущення спіралі, що дало змогу усунути такі тріщини. Для запобігання корозії арматури та розморожування бетону в нижній частині опор також почали влаштовувати заглушку, а на комлеву частину на висоту до 1 м вище умовного обрізу фундаменту наносити обмазувальну гідроізоляцію з гарячої бітумної мастики або сланцевого лаку. Пізніше від нижньої заглушки відмовилися

і почали наносити ізоляційне покриття на зовнішню і внутрішню поверхні стінки опор ванним просоченням. Для запобігання утворенню конденсату в порожнині опор у їхніх стінках, починаючи з типу СКЦ, почали влаштовувати вентиляційні отвори.

Упродовж експлуатації опор на електрифікованих постійним струмом ділянках з'ясували, що попередньо напружений дріт зазнає інтенсивної електрокорозії в підземній частині [1]. Тому для ділянок, електрифікованих постійним струмом, були запропоновані опори типу СКЦо, СО з комбінованим армуванням – попередньо напруженим із високоміцного дроту по всій висоті опори та ненапруженим стрижневим в її нижній частині. Це

збільшило площу стікання корозійного струму з арматури в бетон і далі в землю, а отже, обумовило зниження щільності струму стікання та уповільнення розвитку електрокорозійного пошкодження. Наявність ненапруженої стрижневої арматури, крім того, забезпечило контрольоване в межах оглядів нахилення опори з розвитком пошкодження замість її раптового обрушення.

Більша частина залізобетонних конічних опор контактної мережі є нероздільними, які встановлюють у попередньо вириті котловани. Зворотна засипка котловану не відтворює природний стан ґрунту, тому опори, на які впливають підвищені згинальні моменти в крутих кривих, а також встановлені на укосах насипів, особливо нестійких, схильні до нахилення. Для таких випадків, починаючи з перших типів опор, додатково до нероздільних були впроваджені укорочені роздільні опори, які встановлюють у збірні залізобетонні фундаменти стаканного типу. За формою поперечного перерізу нижньої частини фундаменти виготовляли спочатку двотавровими, потім трипроменевими. Для цих фундаментів були розроблені спеціальні агрегати-віброзанурювачі АВСЕ, які забезпечували вібраційне занурення фундаменту у ґрунт. Такий фундамент ущільнює ґрунт навколо себе і за рахунок цього, а також свого розвинутого перерізу забезпечує набагато кращий опір згинальним моментам порівняно з нероздільною конічною опорою.

Проте вдвічі більша кількість деталей обумовлювала і більшу трудомісткість зведення опорної конструкції, тому в 1980-х рр. було запропоновано цікаве конструктивно-технологічне рішення, яке мало на меті поєднати зазначені переваги нероздільних опор і віброзанурених фундаментів – опори виготовляли зі зворотною конічністю комлевої частини (типу СОК), а агрегат АВСЕ оснастили металевим штампом такої самої форми [4]. Котлован у ґрунті виштамповували, і

встановлена опора самоущільнювалася в ньому під власною вагою. Таке подвійне ущільнення ґрунту мало забезпечити підвищену здатність опиратися нахилу від згинального моменту. На жаль, низка проблем того часу зробила це конструктивно-технологічне рішення несвоєчасним. Значна кількість котлованів не піддавалася якісному виштамповуванню через неоднорідність ґрунту, наявність у ньому кам'янистих включень, кореневої системи рослин тощо, і значну частину цих опор на дослідних ділянках вимушені були встановлювати традиційним способом – встановленням у відриті котловани зі зворотною засипкою. Природно, що стійкість таких опор у ґрунті виявилася ще гіршою, ніж у традиційних конічних по всій довжині опор. Можливо, цю проблему могло б вирішити застосування георадарів, але до їх впровадження ще були десятки років.

Попередньо напружене армування опор, особливо типу СОК, повернуло обумовлені особливостями технології їх виготовлення проблеми, пов'язані з нейтралізацією бетону захисного шару [4, 10]. Центрифуговані опори бетонують у формах, що збираються із двох півформ. На стенд укладають нижню півформу, армують простір над нею і заповнюють бетонною сумішшю, одягають верхню півформу і стягують півформи бовтами. Зібрану форму переставляють на центрифугу і центрифугують. Бетонна суміш розподіляється по внутрішній поверхні форми, ущільнюється, зайва вода відтискається і за рахунок конічності виводиться відцентровою силою із форми в бік комлевої частини. Після центрифугування форму поміщують у пропарювальну камеру і піддають тепловологісній обробці. У перших конічних опор із ненапруженою арматурою каркас збирали на кондукторі, обв'язували бетонними фіксаторами захисного шару і поміщали у форму. Це забезпечувало надійне дотримання вимог до захисного шару бетону.

Для переходу на попередньо напружене армування форми зробили силовими, а збиральний стенд сумістили з гідравлічною натяжною станцією. Спочатку на від'єднуванні від стенда оголовки навішували попередньо намотаний на «мотовилі» пакет із безперервного дроту у 24 обороти (48 дротин), на який перед цим одягали підсилювальні кільця і бухту дроту для спірального армування, частково натягували пакет, розмотували та фіксували в'язальним дротом спіраль. Потім по роликах стенда підкочували під пакет нижню півформу, заповнювали бетонною сумішшю, одягали верхню півформу, скріплювали півформи відкидними бовтами, донатягували пакет і передавали його натяг на форму за допомогою упорних гвинтів між формою та оголовком. Незважаючи на те, що в технологічній документації були передбачені бетонні фіксатори захисного шару з випусками в'язального дроту, їх встановлення не забезпечувало захисний шар – вони збивалися під час підкочування нижньої півформи. Регулювання роликів за висотою, яке допомогло би вирішити цю проблему, на наявній на той час технологічній базі налагодити на постійній основі не вдалося. Тому в попередньо напружених опорах виникали суттєві порушення товщини захисного шару, яка не піддавалася контролю наявними електромагнітними приладами через нерегулярне розміщення подовжньої арматури (чергування окремих дротів і пучків по декілька дротин), її зближення по довжині, густу спіраль.

В опорах зі зворотною конічністю комлевої частини в місці переламу встановлювали розпірне кільце. Під час донатягування пакета вже в закритій формі кільце разом з усім арматурним пакетом зміщувалося вбік аж до торкання спіральною арматурою поверхні форми, захисний шар до робочої арматури однобічно неконтрольовано зменшувався до 3 мм (діаметра спіральної арматури). Це призвело до того, що на поверхні опор типу

СОК через 1–2 роки після встановлення з'являлись іржаві смуги навпроти спіральної арматури. Спеціальне тарування електромагнітних приладів ИЗС-10Н, виконане НДІБК, дало змогу провести масштабні дослідження мінімальної товщини захисного шару до робочої арматури 9127 опор, виготовлених шістьма різними заводами і встановлених на залізницях України. Розподіл опор за товщиною захисного шару наведено на рис. 4, а. Було встановлено, що захисний шар не відповідає нормативним вимогам (23 +5; -3 мм) у 80,2 % опор типу С і 99,4 % опор типу СОК. Після впровадження низки організаційно-технічних заходів ці показники вдалося знизити для опор типу С до 50,8 %, а для опор типу СОК лише до 84,1 %, через що вони були зняті з виробництва, а частина їх, що мала захисний шар менше 5 мм, демонтована [4]. Схожий розподіл опор за товщиною захисного шару спостерігається й на залізниці Азербайджану (рис. 3, б) [13], де у близько 42 % опор виготовлення 1960-х рр. товщина захисного шару не відповідає нормативним вимогам.

Отже, виготовлення опор центрифугуванням забезпечило високу щільність і міцність бетону, а також повільне просування фронту карбонізації. Проте особливості конструкції і технології виробництва цих опор обумовили значні коливання товщини захисного шару, а отже, доволі значну кількість експлуатованих опор із недостатньою товщиною захисного шару і тривалістю його карбонізації.

Термодинамічний аналіз реакції нейтралізації бетону захисного шару вуглекислим газом. Взаємодія вуглекислого газу CO_2 із гідроксидом кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ відбувається в поровому просторі бетону, точніше продуктів гідратації цементу, який може містити як повітря, так і поровий електроліт – насичений водний розчин $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Реакція видається можливою або безпосередньо, або через проміжне утворення карбонатного

CO_3^{2-} чи гідрокарбонатного HCO_3^- іонів відповідно. Можливі реакції наведені в табл. 2. Оскільки розчинення $\text{Ca}(\text{OH})_2$ відбувається, але на кінцевий результат не впливає, в окрему реакцію в табл. 2 воно не виділено. З точки зору кінцевого продукту – карбонату кальцію CaCO_3 – послідовність реакції не має значення. Але коефіцієнти

дифузії газів у газовому середовищі та іонів у водному розчині навіть через пористі тіла відрізняються на порядки, тому фактична послідовність реакцій визначатиме кінетику просування фронту карбонізації. Переважність реакцій визначено за допомогою їх термодинамічного аналізу. Результати розрахунків наведено в табл. 2.

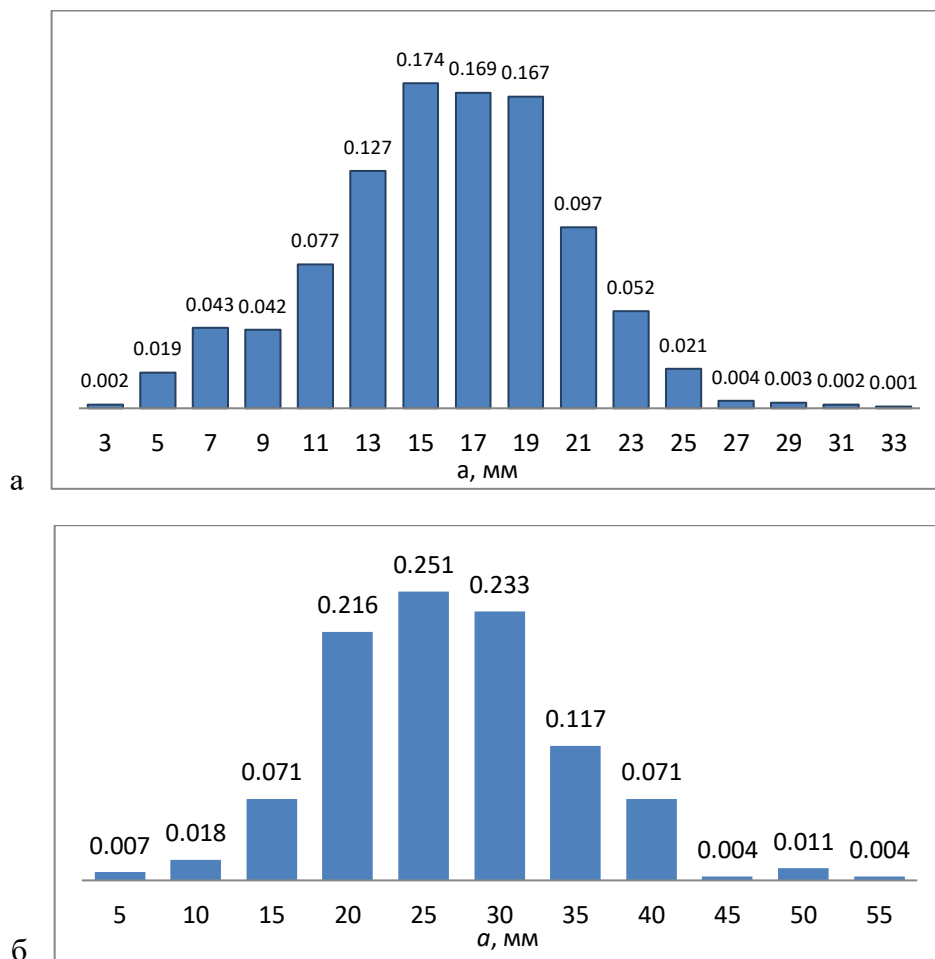


Рис. 4. Гістограми розподілу опор за мінімальною товщиною захисного шару за даними робіт [4] (а) і [13] (б)

Таблиця 2

Можливі реакції карбонізації вапна, їхня вільна енергія Гіббса ΔG^0 і рівняння рівноваги з константою рівноваги K у стандартних умовах

Но-мер	Реакція	ΔG^0 , кДж/моль	Рівняння рівноваги з константою рівноваги
1	$\text{CO}_{2\text{газ}} + \text{Ca}(\text{OH})_{2\text{тв}} = \text{CaCO}_{3\text{тв}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{рід}}$	-409,07	$1 / P_{\text{CO}_2} = 4,65 \cdot 10^{71}$
2	$\text{CO}_{2\text{газ}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{рід}} = 2\text{H}^+_{\text{aq}} + \text{CO}_3^{2-}_{\text{aq}}$	103,59	$[\text{H}^+_{\text{aq}}]^2 \cdot [\text{CO}_3^{2-}_{\text{aq}}] / P_{\text{CO}_2} = 7,1 \cdot 10^{-19}$

3	$CO_3^{2-}{}_{aq} + Ca(OH)_{2TB} = CaCO_{3TB} + 2OH^-{}_{aq}$	-566,3	$[OH^-{}_{aq}]^2 / P_{CO_2} = 1,6 \cdot 10^{99}$
4	$CO_{2газ} + H_2O_{рід} = H^+{}_{aq} + HCO_3^-{}_{aq}$	44,72	$[H^+{}_{aq}] \cdot [HCO_3^-{}_{aq}] / P_{CO_2} = 1,46 \cdot 10^{-8}$

Із табл. 2 видно, що в реакціях 1 і 3 безпосередньої взаємодії $CO_{2газ}$ і взаємодії карбонат-іона $CO_3^{2-}{}_{aq}$, відповідно, з $Ca(OH)_{2TB}$ за стандартних умов вільна енергія Гіббса ΔG^0 негативна, а константа рівноваги набагато більша 1, отже, ці реакції суттєво зміщені в бік продуктів і відбуваються довільно. Судячи з рівняння рівноваги, протікання реакції 1 визначено парціальним тиском $CO_{2газ}$, проте значна величина константи рівноваги свідчить, що реакція довільно протікатиме навіть за дуже малих величин парціального тиску P_{CO_2} .

У реакціях 2 і 4 розчинення $CO_{2газ}$ з утворенням гідроксил-іона $2H^+{}_{aq}$ та карбонат-іона $CO_3^{2-}{}_{aq}$ або гідрокарбонат-іона $HCO_3^-{}_{aq}$, відповідно, за стандартних умов вільна енергія Гіббса ΔG^0 позитивна, а константа рівноваги набагато менша 1, отже, ці реакції суттєво зміщені в бік реагентів і довільно не відбуваються.

Незважаючи на можливість довільного протікання реакції 3, утворення карбонату кальцію через неї малоімовірне

через малоімовірність реакції 2. Отже, термодинамічний аналіз показує, що нейтралізація $Ca(OH)_2$ вуглекислим газом CO_2 відбувається без утворення іонів $CO_3^{2-}{}_{aq}$ і $H^+{}_{aq}$ через розчинення молекул CO_2 , тому кінетика просування фронту карбонізації визначатиметься дифузійною швидкістю цих молекул через поровий простір уже карбонізованого шару бетону. Дифузія молекул може відбуватися крізь поровий електроліт або повітря порового простору.

Теоретичний аналіз процесу карбонізації та кінетики просування її фронту. Схему карбонізації захисного шару бетону опор контактної мережі та просування її фронту від зовнішньої поверхні всередину до арматури наведено на рис. 5. Граничним станом від розвитку карбонізації можна вважати досягнення цим фронтом робочої арматури, після чого відбувається її депасивація та швидка корозія до втрати опорою здатності сприймати розтягувальні напруження від згинального моменту.

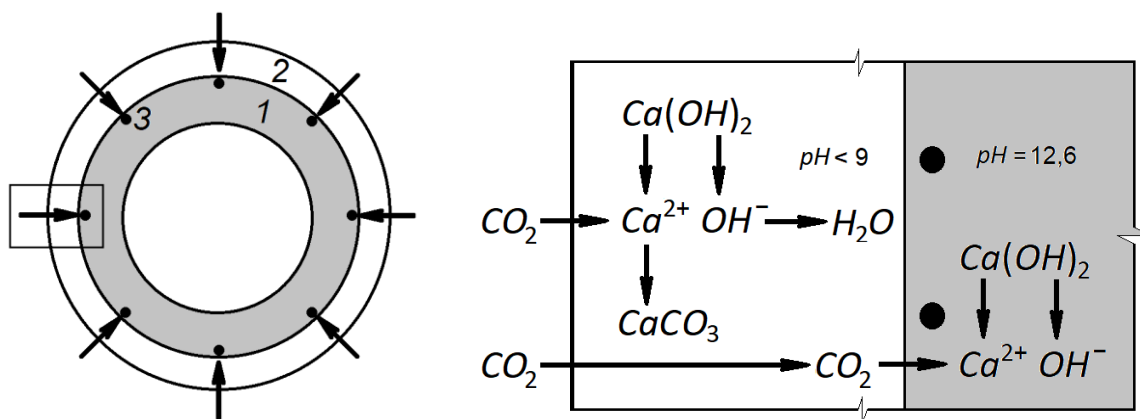


Рис. 5. Схема просування карбонізації бетону захисного шару в поперечному перерізі опори контактної мережі: 1 – некарбонізований бетон; 2 – карбонізований бетон захисного шару; 3 – робоча арматура

Застосування рівняння (5) для визначення реакційної здатності m_0

центрифугованого бетону зі зниженою пористістю через стиснені умови для

утворення $CaCO_3$ може призвести до некоректного оцінювання кінетики просування фронту карбонізації. Проаналізуємо процес просування фронту карбонізації в таких умовах. Карбонізація є результатом зустрічі молекули CO_2 з іонами Ca^{2+} з утворенням $CaCO_3$ з подальшим надходженням CO_2 у порову вологу бетону від його поверхні. Поблизу поверхні концентрація Ca^{2+} і, отже, OH^- знижується. Зниженню концентрації Ca^{2+} перешкоджає дифузійне перенесення цих іонів з об'єму бетону до його поверхні. Зі зниженням в об'ємі концентрації Ca^{2+} відбувається подальше розчинення $Ca(OH)_2$. Найбільш інтенсивно розчинення відбуватиметься поблизу зони реакції (фронту карбонізації), оскільки там концентрація Ca^{2+} найнижча. Так відбувається поки поблизу поверхні бетону існують умови для зростання кристалів $CaCO_3$. З кольматацією порового простору цими кристалами фронт карбонізації переміщується вглиб бетону.

Виходячи з викладеного, припустимо, що величину реакційної здатності бетону m_0

можна визначити як об'єм CO_2 , необхідний для утворення такої кількості $CaCO_3$, яка заповнить увесь об'єм доступних для води пор в одиниці об'єму бетону. Об'єм доступних для води пор і відповідно об'єм $CaCO_3$, який може їх заповнити, характеризує водопоглинання бетону за об'ємом:

$$W_V = W_m \rho_b / \rho_v, \% \quad (6)$$

З урахуванням щільності та молекулярної маси CO_2 і $CaCO_3$ $\rho_{CO_2} = 1,977 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{CaCO_3} = 2711$, $M_{CO_2} = 44$, $M_{CaCO_3} = 100$ відповідно об'єм CO_2 , необхідний для утворення такої кількості $CaCO_3$, складе, $\text{см}^2/\text{см}^2$,

$$m_0 = \frac{W_V}{100} \cdot \frac{\rho_{CaCO_3} M_{CO_2}}{\rho_{CO_2} M_{CaCO_3}} = \frac{W_m \rho_b \rho_{CaCO_3} M_{CO_2}}{100 \rho_v \rho_{CO_2} M_{CaCO_3}} = 14,48 W_m \quad (7)$$

Тривалість τ карбонізації захисного шару товщиною x в атмосферних умовах виходячи з закону Фіка складе [9], роки,

$$\tau = \frac{m_0 x^2}{2D'c}, \text{ с}; \quad \tau = \frac{m_0 x^2}{6,3072 \cdot 10^7 \cdot D'c} = \frac{m_0 x^2}{2,2075 \cdot 10^4 \cdot D'} \quad (8)$$

де c – концентрація CO_2 в атмосфері, $0,035 \% = 0,00035 \text{ см}^3/\text{см}^3$.

За рівнянням (8), кінетична залежність просування фронту карбонізації бетону експлуатованих в атмосферних умовах опор контактної мережі матиме вигляд, см,

$$x = \sqrt{\frac{2D'c\tau}{m_0}} = \sqrt{\frac{2,2075 \cdot 10^4 \cdot D'\tau}{m_0}} \quad (9)$$

де m_0 доцільно визначити за альтернативними рівняннями (5) і (7) і приймати для аналізу кінетики менше з них.

Експериментальне дослідження впливу факторів на кінетику карбонізації та довговічність опор контактної мережі. Досліджено чотири опори, виготовлені в 1985–87 рр. Номінальний склад бетону (у перерахунку на сухі заповнювачі), кг/1 м³ бетону: портландцемент, що відповідає сучасному СЕМ І-500, – 447–498; пісок кварцовий із модулем крупності близько 2 – 475–582; щебінь гранітний суміші фракцій 5–20 мм – 1356–1165; вода – 192–209. В/Ц – 0,43–0,42. Під час центрифугування відтискається та виводиться з опори шлам в обсязі 4–5 % об'єму бетону. Оскільки шлам переважно складається з води, можна прийняти зменшення вмісту води в бетонній суміші в середньому на 45 кг/м³, отже до 147–164 кг. Відповідно залишковий В/Ц склав 0,31–0,33. Реакційна здатність бетону m_0 , за формулою (5), для витрат цементу 0,447–0,498 г/см³ складе 32,558–36,273 см³/см³, у середньому $m_{0,сеп} = 34,416$ см³/см³.

Величини водопоглинання W_m за результатами випробувань 18 зразків із чотирьох опор, склали: мінімальна $W_{m,min} = 1,7$ %, максимальна $W_{m,max} = 3,1$ %, середня $W_{m,сеп} = 2,47$ %. Величини

реакційної здатності бетону m_0 , за формулою (7), складуть: мінімальна $m_{0,min} = 24,616$ см³/см³, максимальна $m_{0,max} = 44,888$ см³/см³, середня $m_{0,сеп} = 35,766$ см³/см³.

Як бачимо, величини реакційної здатності бетону m_0 , визначені за формулами (5) і (7), мають добру збіжність – їхні середні значення 34,416 і 35,766 см³/см³ близькі. Для подальшого аналізу прийемо $m_{0,сеп} = 35,766$ см³/см³.

Під час прискорених випробувань на дифузійну проникність трьох зразків бетону із трьох різних опор, що мали мінімальне, максимальне та найближче до середнього значення водопоглинання, глибина карбонізації знаходилася в межах 1,2–1,5 мм. Величини ефективного коефіцієнта дифузії D' , визначені за формулою (4), склали $0,46 \times 10^{-5}$, $0,61 \times 10^{-5}$, $0,51 \times 10^{-5}$, у середньому $D'_{сеп} = 0,53 \times 10^{-5}$ см²/с.

Побудовані за рівнянням (9) для отриманих прискореними випробуваннями $m_{0,сеп} = 35,766$ см³/см³, $D'_{min} = 0,46 \times 10^{-5}$ см²/с і $D'_{max} = 0,61 \times 10^{-5}$ см²/с кінетичні залежності глибини карбонізації x від τ наведені на рис. 6.

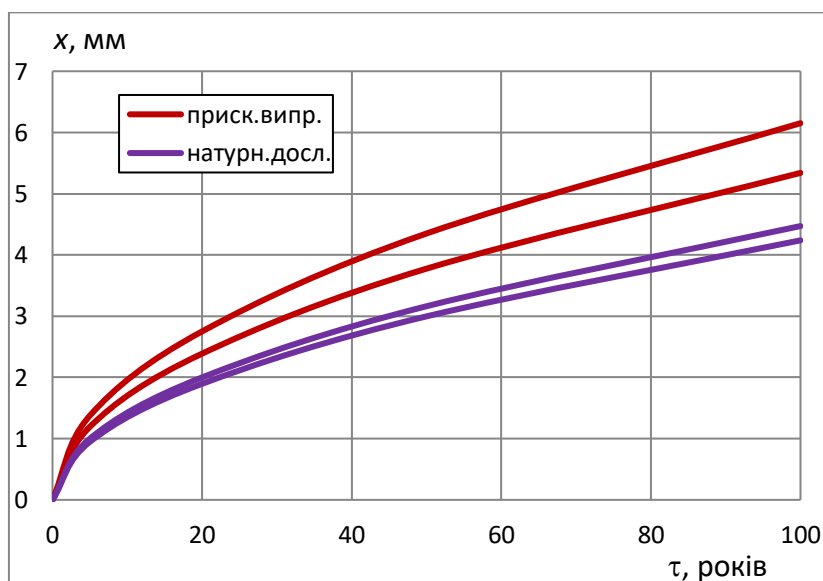


Рис. 6. Кінетика просування фронту карбонізації в захисному шарі бетону опор контактної мережі за результатами прискорених випробувань і натурних досліджень

У результаті натурних досліджень опор після 50 років експлуатації на ділянці Ваку – Воуук Kesik Азербайджанської залізниці, електрифікованій постійним струмом, встановлено, що міцність бетону опор на стиск знаходиться в межах 41-62,5 МПа, середня складає 50,5 МПа, гарантована із забезпеченістю 95 % – 48 МПа. Товщина зовнішнього захисного шару складає 25-30 мм, глибина його карбонізації – 1-3 мм, арматура корозії не зазнала. 89,3 % опор мають незначні пошкодження I і II категорії і можуть бути залишені під наглядом або усунуті дрібним ремонтом, 10,7 % – пошкодження III і IV категорії у вигляді подовжніх тріщин розкриттям 0,4 мм, відколів бетону, руйнування верхніх заглушок і підлягають заміні (кількість уже заміненних за 50 років опор невідома). Близько 30 % опор відхиляються від вертикалі більше ніж на 2°.

Для уточнення величин ефективного коефіцієнта дифузії D' рівняння (8) подано як, $\text{см}^2/\text{г}$,

$$D' = \frac{m_0 x^2}{2,2075 \cdot 10^4 \cdot \tau}, \quad (10)$$

За формулою (10), для $m_{0,\text{сеп}} = 35,766 \text{ см}^3/\text{см}^3$, $x = 0,1$ і $0,3 \text{ см}$, уточнені величини D' складуть $0,32 \times 10^{-5}$ і $0,29 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$. Побудовані за рівнянням (9) для отриманих натурними дослідженнями величин $D'_{\text{min}} = 0,29 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ і $D'_{\text{max}} = 0,35 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ кінетичні залежності глибини карбонізації x від τ наведені на рис. 6.

Як бачимо, прискорені випробування дають завищені на 37–43 % величини ефективного коефіцієнта дифузії D' для центрифугованого бетону опор контактної мережі. Відповідно зміщені й графіки кінетичних залежностей (рис. 6). Це може

бути пояснено тим, що під час тривалої експлуатації опор відбувається кольматація порового простору бетону карбонатом кальцію з відповідним зниженням дифузійної проникності. У разі використання для оцінювання довговічності опор величин ефективного коефіцієнта дифузії D' , визначеного прискореним методом, до нього необхідно застосовувати поправковий коефіцієнт $(0,29+0,35)/(0,46+0,61) = 0,6$.

Як бачимо із рівнянь (7) і (8), тривалість карбонізації захисного шару бетону до робочої арматури опор контактної мережі залежить від товщини захисного шару a , ефективного коефіцієнта дифузії CO_2 в бетоні D' і реакційної здатності бетону відносно CO_2 m_0 а, отже, за рівнянням (7), – від водопоглинання бетону W_m . Дослідимо вплив кожного з цих факторів. Цей вплив кількісно характеризує питома вага γ (ступінь впливу) кожного з них:

$$\gamma_a = \frac{V_a^2}{V_a^2 + V_D^2 + V_W^2}; \quad (11)$$

$$\gamma_D = \frac{V_D^2}{V_a^2 + V_D^2 + V_W^2}; \quad (12)$$

$$\gamma_W = \frac{V_W^2}{V_a^2 + V_D^2 + V_W^2}, \quad (13)$$

де V_a – коефіцієнт варіації тривалості τ_a карбонізації захисного шару, обумовлений коливанням величини товщини захисного шару (рис. 4, а) за однакових середніх величин $D'_{\text{сеп}} = 0,53 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ і $W_{m,\text{сеп}} = 2,47 \%$;

V_D – коефіцієнт варіації тривалості τ_D карбонізації захисного шару, обумовлений коливанням величини ефективного коефіцієнта дифузії D' за однакових середніх значень $a_{\text{сеп}} = 1,4 \text{ см}$ і $W_{m,\text{сеп}} = 2,47 \%$;

V_W – коефіцієнт варіації тривалості τ_W карбонізації захисного шару, обумовлений коливанням величини водопоглинання бетону W_m за середніх значень $D'_{сер} = 0,53 \times 10^{-5}$ см²/с і $a_{сер} = 1,4$.

Тривалість карбонізації τ_a , τ_D , τ_W визначали за рівняннями (7) і (8), підставляючи в них зазначені аналізовані та середні величини.

Для визначення V_a розрахуємо середньоквадратичне відхилення S_a :

$$S_a = \sqrt{\sum_{i=1}^n q_i (\tau_{xi} - \tau_{x,сер})^2} = 436,4 \quad (14)$$

де q_i – густина розподілу на i -му інтервалі гістограми на рис. 4, a ;

τ_{xi} – тривалість карбонізації захисного шару товщиною a_i , що відповідає i -му інтервалу гістограми на рис. 4, a , визначена за формулами (7) і (8);

$\tau_{x,сер} = 706,3$ років – тривалість карбонізації захисного шару середньої за гістограмою на рис. 4, a товщини $a_{сер} = 1,5$ см.

$$V_a = S_a / \tau_{x,сер} = 0,62. \quad (15)$$

Для визначення V_D розрахуємо середньоквадратичне відхилення S_D :

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tau_{Di} - \tau_{D,сер})^2} = 101,1, \quad (16)$$

де n – кількість визначених значень D' , 3;

τ_{Di} – тривалість карбонізації захисного шару товщиною $a_{сер} = 1,4$ см, що відповідає i -му із трьох визначених значень $D' = 0,46 \times 10^{-5}$, $0,61 \times 10^{-5}$ і $0,51 \times 10^{-5}$ см²/с;

$\tau_{D,сер} = 698,1$ років – тривалість карбонізації захисного шару товщиною $a_{сер} = 1,4$ см, що відповідає середньому значенню $D'_{сер} = 0,53 \times 10^{-5}$ см²/с.

$$V_D = S_D / \tau_{D,сер} = 0,14. \quad (17)$$

Для визначення V_W розрахуємо середньоквадратичне відхилення S_W :

$$S_W = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tau_{Wi} - \tau_{W,сер})^2} = 119,7, \quad (18)$$

де n – кількість визначених значень W_m , 18;

τ_{Wi} – тривалість карбонізації захисного шару товщиною $a_{сер} = 1,4$ см, що відповідає i -му із 18 визначених значень W_m ;

$\tau_{W,сер} = 704,0$ років – тривалість карбонізації захисного шару товщиною $a_{сер} = 1,4$ см, що відповідає середньому значенню $W_{m,сер} = 2,47$ %.

$$V_W = S_W / \tau_{W,сер} = 0,17. \quad (19)$$

Підставляючи $V_a = 0,62$, $V_D = 0,14$ і $V_W = 0,17$ у формули (11)-(13), отримаємо $\gamma_a = 0,89$, $\gamma_D = 0,04$ і $\gamma_W = 0,07$.

Отже, найбільш впливовим фактором, що визначає тривалість карбонізації захисного шару бетону, а отже, і довговічність опор контактної мережі, є товщина захисного шару.

Мінімальна товщина захисного шару бетону до робочої арматури, що забезпечить нормований термін служби опор контактної мережі 50 років за найбільш несприятливими значеннями $W_{m,min} = 1,7$ % і $D'_{max} = 0,61 \times 10^{-5}$ см²/с, складе $a = 4,5$ мм.

Висновки. У результаті аналізу впливу конструктивних особливостей і технологічних факторів на характеристики захисного шару бетону опор контактної мережі встановлено, що виготовлення опор центрифугуванням забезпечує високу щільність бетону, а отже, дуже повільну карбонізацію. Проте зазначені особливості обумовили значні коливання товщини захисного шару і значну кількість експлуатованих опор із недостатньою товщиною захисного шару.

У результаті термодинамічного аналізу встановлено, що нейтралізація $Ca(OH)_2$ вуглекислим газом відбувається без утворення іонів CO_3^{2-aq} через розчинення молекул CO_2 , тому кінетика

просування фронту карбонізації визначена дифузією цих молекул через поровий електроліт або повітря порового простору бетону. У результаті теоретичного аналізу процесу карбонізації та кінетики просування її фронту запропоновані рівняння, ґрунтовані на законі Фіка. Показано, що для карбонізації щільного центрифугованого бетону об'ємом доступних для води пор, а отже, водопоглинанням бетону, запропоновано нове рівняння для визначення реакційної здатності.

У результаті досліджень кінетики карбонізації прискореним методом визначено величини ефективного коефіцієнта дифузії CO_2 в бетоні опор D' , які знаходяться в межах $0,46-0,61 \times 10^{-5}$ см²/с, отримано кінетичні залежності просування фронту карбонізації. За результатами натурних обстежень опор, що знаходилися в

експлуатації 50 років, величини D' уточнені та склали $0,29-0,35 \times 10^{-5}$ см²/с, тобто зменшилися на 37–43 %, що свідчить про зниження дифузійної проникності бетону з часом за рахунок кольматації порового простору карбонатом кальцію. Для оцінювання довговічності опор запропоновано до визначених прискореним методом величин D' застосовувати поправковий коефіцієнт 0,6. У результаті статистичного аналізу встановлено, що найбільш впливовим фактором, що визначає тривалість карбонізації захисного шару бетону, а отже, довговічність опор контактної мережі, є товщина захисного шару. Мінімальна товщина захисного шару бетону до робочої арматури, що гарантовано забезпечить нормований термін служби опор контактної мережі 50 років, складає 4,5 мм.

Список використаних джерел

1. Вайнштейн А. Л., Павлов А. В. Коррозионные повреждения опор контактной сети. Москва: Транспорт, 1988. 111 с.
2. Механізм електрокорозії залізобетонних конструкцій під впливом високовольтної перемінної напруги в контактних проводах / А. А. Пługін, А. М. Пługін, Д. А. Пługін та ін. *Комунальне господарство міст*. 2012. № 103.
3. Кудрявцев А. А. Несущая способность опор контактной сети. Москва: Транспорт, 1988. 160 с.
4. Пługін А. А. Підвищення якості опор контактної мережі на основі використання статистичних методів. *Міжвузівський збірник наукових праць*. Харків: ХІПТ, 1990. Вип. 13. С. 51-57.
5. John Stark, Bernd Wicht. Dauerhaftigkeit von Beton. Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar Universität. 1995.
6. Usharov-Marshak A.V. Calorimetry of cement and concrete. Fact, Kharkiv. 2002. 183 p.
7. Герега А. Н., Вировой В. М. Кластерна структура композитів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 53. С. 88-97.
8. Основи теорії твердіння, міцності, руйнування та довговічності портландцементу, бетону та конструкцій із них. Т. 3. Теорія міцності, руйнування та довговічності бетону, залізобетону та 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.
9. Alekseev S. N., Ivanov F. M., Modry S., Schiessel P. Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Media. Stroyizdat. 1990. 320 p.
10. Пługін А. А. Удосконалення складу та структури бетону з урахуванням електроповерхневих властивостей його складових для підвищення міцності та стійкості виробів кільцевого перерізу: дис. ... канд. техн. наук; 05.23.05. Харків: ХІБІ, 1994. 245 с.

11. Babushkin V. I., Matveyev G. M., Mchedlov-Petrossyan O. P. Thermodynamics of Silicates. *Springer Nature*. 2011. 459 p.
 12. Chase M. W. NIST-JANAF Thermochemical Tables (4th edition). *Journal of Physical and Chemical Reference Data, Monograph*. 1998. № 9.
 13. Existing Overhead Contact Line Assessment of Concrete Poles Baku – Boyuk Kesik (Georgian Border). Report evaluation of concrete poles. ILF Consulting Engineers Austria GmbH, Innsbruck, Austria. DB Engineering and Consulting GmbH, Leipzig, Germany. 2016. 40 p.
-

Наджафов Ельшад Фаїг огли, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID 0000-0002-6143-8183. E-mail: bmcs@kart.edu.ua.

Чженьхуа Є, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: bmcs@kart.edu.ua.

Плугін Дмитро Артурович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-4359-4369. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: plugin.da@kart.edu.ua.

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.

Najafov Elshad, PhD student, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, ORCID 0000-0002-6143-8183. E-mail: bmcs@kart.edu.ua.

Zhenhua Ye, PhD student, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: bmcs@kart.edu.ua.

Plugin Dmytro, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-4359-4369. Tel.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: plugin.da@kart.edu.ua.

Plugin Andrii, Professor, Head of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, 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.

Статтю прийнято 12.12.2024 р.

УДК 69.04

ДОСЛІДЖЕННЯ СВІТОВОГО ДОСВІДУ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ

Асп. І. К. Фесун

RESEARCH OF INTERNATIONAL EXPERIENCE IN PROVIDING A REGULATORY FRAMEWORK FOR CALCULATING RESISTANCE OF BUILDINGS TO THE PROGRESSIVE COLLAPSE

Postgraduate student I. K. Fesun

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320888>

Анотація. Мінімізація можливості виникнення прогресуючого обвалення є одним із найголовніших завдань забезпечення надійності будівель. У цій роботі надано аналіз нормативних баз світового досвіду щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення

для поточного стану вітчизняної. Метою роботи був пошук у відповідних закордонних нормативних документах базової інформації про забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення, зокрема мінімальні необхідні характеристики будівель для врахування прогресуючого обвалення на стадії проектування, вжиті підходи для зменшення вірогідності прогресуючого обвалення, основні критерії визначення прогресуючого обвалення, параметри моделювання прогресуючого обвалення за методом раптового видалення несучої конструкції.

У статті порівняно ключові положення норм, основну увагу приділено пропонованим підходам для зниження ймовірності прогресуючого обвалення, саме зокрема методи альтернативного шляху.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, локальне руйнування, аналіз альтернативного шляху, моделювання, нормативна база.

Abstract. *Minimizing the possibility of progressive collapse is one of the most important tasks in ensuring the reliability of buildings. This paper analyzes the regulatory frameworks of the world experience in ensuring resilience to progressive collapse to the current state of the national one. The purpose of the work was to search for basic information on ensuring resistance to progressive collapse in relevant foreign regulatory documents, in particular: minimum required characteristics of buildings to take into account progressive collapse at the design stage, accepted approaches to reducing the probability of progressive collapse, basic criteria for determining progressive collapse, parameters of modeling progressive collapse by the method of the sudden removal of the load-bearing structure.*

Current editions of foreign regulatory documents on ensuring resistance to progressive collapse contain similar provisions. The article compares the key provisions of the norms, in particular, the main attention is paid to the main approaches to reducing the probability of progressive collapse, namely the alternative path method. The alternative path method can be implemented in three ways: linear statics, nonlinear statics, and nonlinear dynamics.

The minimum characteristics of buildings to take into account progressive collapse in the design are based not only on the building category (risk level, risk category), but also on additional parameters such as number of storeys, building purpose, new construction or reconstruction.

The criteria for determining progressive collapse are generally characterized by the acceptance criteria for the rest of the building structure as a result of explicit consideration of resistance to progressive collapse (modeling of the progressive collapse process). The criteria vary from one regulatory document to another, but in general, these criteria are not allowed to be exceeded - localized failure of load-bearing structures is not allowed, except for the removed structure.

Keywords: *progressive collapse, local failure, alternative path analysis, modeling, regulatory framework.*

Вступ. Усі будівлі можуть зазнавати певних аварійних впливів, що характеризуються локальним руйнуванням несучих конструкцій. Таке локальне руйнування може призвести до повного руйнування будівлі або значної її частини. Це явище отримало назву «прогресуюче обвалення» [6]. Причинами виникнення прогресуючого обвалення можуть бути як природні стихії, так і терористичні акти і бойові дії. Із початком повномасштабного вторгнення РФ в Україну актуальність

дослідження є безсумнівною, оскільки мінімізація можливості виникнення прогресуючого обвалення постає як одне з найголовніших завдань із забезпечення надійності будівель [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перший випадок прогресуючого обвалення, а саме житлової багатоповерхової будівлі «The Ronan Point» у Лондоні, Велика Британія, у 1968 році ознаменував початок всебічного вивчення цього явища. Перед інженерною та

науковою спільнотою постало завдання подальшого максимального унеможливлення виникнення явища прогресуючого обвалення будівель і споруд. Як наслідок, менш ніж за рік після зазначеної трагедії були введені зміни насамперед в нормативних базах Великої Британії – упроваджені перші рекомендації для забезпечення стійкості за прогресуючого обвалення саме для крупнопанельних будівель. Хоча при цьому окремі положення містили вже певні розрахункові вимоги, наприклад здатність несучих елементів витримувати тиск 34 кПа, згадані зміни стосувалися більше превентивних заходів щодо попередження виникнення явища прогресуючого обвалення [3, 7].

У 1970-х роках і в нормативних базах інших країн, зокрема США, Канади, Європейського Союзу, були введені перші зміни, що стосувалися забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення. Ці зміни багато в чому дублювали вже згадані британські норми.

У 1980-х роках, імовірно, через відсутність резонансних аварій, викликаних прогресуючим обваленням, розвиток нормативного забезпечення інженерних розрахунків із забезпечення стійкості будівель і споруд практично не відбувався.

Однак у 1990-х роках після вибуху у Всесвітньому торговому центрі (1993 рік) низка будівель у США стала об'єктами терористичних актів, внаслідок чого деякі з них були зруйновані шляхом прогресуючого обвалення. Ці випадки стали поштовхом для розроблення будівельних норм і стандартів для захисту будівель від прогресуючого обвалення.

У роботах [3, 6, 7] розглянуто нормативні документи з визначенням особливостей положень.

Визначення мети та завдання дослідження. Сучасний стан нормативної бази України щодо стійкості до прогресуючого обвалення, зокрема національної гілки, характеризується як

малозабезпечений і непорядкований. Головними причинами є відсутність методики виконання розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення та відсутність критеріїв визначення прогресуючого обвалення [5].

У цій роботі проаналізовано нормативні бази світового досвіду щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення для поточного стану вітчизняної. Розглянуто такі нормативні документи:

EN 1991-1-7:2006. Єврокод 1: Дії на конструкції. Частина 1-7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи – застосування для всіх будівель на території дії Єврокоду [0].

GSA 2016 (Alternative path analysis & design guidelines for progressive collapse protection 2016) – аналіз альтернативного шляху та рекомендації з проектування для прогресуючого обвалення – застосування для будівель федерального уряду США [0].

UFC 4-023-03 (Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse). Уніфіковані критерії об'єктів. Проектування будівель проти прогресуючого обвалення – застосування для будівель Міністерства оборони США [0].

Метою роботи був пошук у відповідних закордонних нормативних документах базової інформації щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення, зокрема:

- мінімальні необхідні характеристики будівель для врахування прогресуючого обвалення на стадії проектування;
- вжиті підходи для зменшення вірогідності прогресуючого обвалення;
- основні критерії визначення прогресуючого обвалення;
- параметри моделювання прогресуючого обвалення за методом раптового видалення несучої конструкції.

Основна частина дослідження. EN 1991-1-7:2006. У Єврокодi EN1991-1-7:2006, додаток А [8], визначено вимоги до проектування конструкцій з урахуванням наслідків локального

руйнування будівель від невстановлених причин. У цих нормах передбачена стратегія, яка дає змогу проєктувати будівлі так, щоб ні сама будівля, ні її значна частина не зазнавали руйнування в разі локального пошкодження. Тривалість забезпечення будівлі стійкою після виникнення особливої події визначена певним періодом часу, необхідним для проведення рятувальних операцій і забезпечення безпечної евакуації людей із будівлі та прилеглих територій [8].

Рекомендована стратегія в додатку А забезпечує достатній рівень живучості будівлі, що дає змогу витримувати локальне руйнування без виникнення непропорційного повного обвалення. Згідно з п. А.4 для будівель встановлено вимоги залежно від класів за наслідками руйнування [8]:

клас 1 – додаткове врахування особливих навантажень від невстановлених причин не потрібне;

клас 2a – передбачити ефективні горизонтальні пов'язі або ефективне анкерування перекриттів у стінах;

клас 2b – забезпечити встановлення горизонтальних пов'язей із влаштованими

вертикальними в'язями у всіх опорних колонах і стінах або перевірити конструкцію будівлі щодо збереження загальної стійкості і неперевищення ступеня локального пошкодження певних меж за умовного видалення кожної опорної колони або балки, що підтримує колону, або будь-якої секції несучої стіни;

клас 3 – для будівлі потрібне систематичне оцінювання ризику з урахуванням прогнозованих і непрогнозованих загроз.

Отже, згідно з вищенаведеними положеннями визначення вразливості до непропорційного обвалення (перевірки збереження загальної стійкості і неперевищення ступеня локального пошкодження певних меж за умовного видалення окремої конструкції; оцінювання ризиків з урахуванням прогнозованих і непрогнозованих загроз) може бути виконане для класу 2b і потрібне для класу 3.

Мінімальні характеристики будівель для визначення вразливості до непропорційного обвалення, за EN 1991-1-7:2006 [8], наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Мінімальні характеристики будівель для визначення вразливості до непропорційного обвалення, за EN 1991-1-7:2006

Призначення будівлі	Характеристика	
	Клас 2b	Клас 3
Готелі, багатоквартирні та інші житлові будівлі	від 4 до 15 поверхів	від 16 поверхів
Будівлі установ освіти	від 1 до 15 поверхів	від 16 поверхів
Торгові будівлі	від 3 до 15 поверхів	від 16 поверхів
Лікарні	до 3 поверхів	від 4 поверхів
Офісні будівлі	від 1 до 15 поверхів	від 16 поверхів
Паркінги	до 6 поверхів	від 7 поверхів
Усі будівлі, що відвідують люди	площа кожного поверху від 2000 до 5000 м ²	площа кожного поверху від 5000 м ²
Стадіони	-	більше 5000 глядачів
Будівлі, у яких знаходяться небезпечні речовини і/або відбуваються технологічні процеси	-	+

За приміткою 3 п. А.4 EN 1991-1-7:2006, межі допустимого локального руйнування можуть бути різними для кожного типу будівлі. Рекомендованим значенням є 15 % площі перекриття, але не більше 100 м² на кожному з двох суміжних поверхів [8].

Видаленими вертикальними елементами можуть бути балка, колона або ділянка стіни довжиною рівною для залізобетонних конструкцій <2.25 висоті поверху. Відповідно до п. А.4, якщо умовне видалення таких колон і секцій стін викликає перевищення встановлених границь пошкодження, такі елементи слід розраховувати як ключові елементи. Згідно з п. А.8 такий ключовий елемент (видалена колона, стіна або балка) має витримувати особливий вплив Ad, що діє в горизонтальному і вертикальному напрямках (у кожному напрямку окремо) на сам елемент і прилеглі компоненти. Рекомендоване значення для конструкцій будівель Ad = 34 кПа.

GSA 2016. Метою застосування цих рекомендацій є зменшення вірогідності виникнення прогресуючого обвалення нових і реконструйованих будівель федерального уряду США. Згідно з основними положеннями рекомендацій встановлено, що зменшення потенціалу виникнення прогресуючого обвалення може бути досягнуте шляхом запобігання початковому руйнуванню несучих конструкцій або шляхом зменшення поширення початкового руйнування.

Застосування проєктування з урахуванням прогресуючого обвалення залежить від необхідного рівня захисту, що формується від поверховості будівлі та рівня безпеки об'єкта. Відповідно до п. 2.3.1-2.3.3 [1] вимоги до об'єктів залежно від рівня безпеки об'єкта такі:

рівень I та II – проєктування з урахуванням прогресуючого обвалення не потрібне, незалежно від кількості поверхів;

рівень III та IV – вимоги цих рівнів застосовують для будівель поверховості 4 і

більше, що визначено від найнижчого зовнішнього рівня до найвищого рівня, механічні поверхи та паркінги не вважають поверхами;

рівень V – вимоги цього рівня застосовують для всіх будівель, незалежно від кількості поверхів.

Настанови проєктування, що містяться в цих рекомендаціях, базовані на мінімізації виникнення прогресуючого обвалення шляхом подолання втрат несучого елемента, незалежно від причини виходу з ладу, обмеження поширення початкового обвалення, забезпечення надлишкової та збалансованої конструктивної системи будівель. Для цього в основу методології покладено аналіз альтернативного шляху, за яким потрібна здатність системи перерозподіляти навантаження від вертикальних несучих конструкцій, що видаляють в окремих місцях. Видаленими вертикальними елементами можуть бути колона або ділянка стіни, довжиною рівною висоті поверху. Реалізація аналізу альтернативного шляху можлива трьома шляхами: лінійна статика, нелінійна статика, нелінійна динаміка. Вимоги до аналізу альтернативного шляху зведено до табл. 2.

Вибір елемента, що видаляють із схеми, залежить від рівня захисту:

рівень III та IV – видаляють зовнішні елементи на першому поверсі від землі та всі елементи (внутрішні та зовнішні) у підземних парковках, навантажувальних майданчиках і зонах неконтрольованого громадського доступу;

рівень V – видаляють внутрішні і зовнішні елементи на кожному поверсі.

Відповідно до п. 3.2.10.1-3.2.10.2 в результаті аналізу альтернативного шляху (видалення несучого вертикального елемента) встановлено критерії ухвалення рішення щодо решти конструкцій будівлі, так звані критерії визначення прогресуючого обвалення. У випадку розгляду нового будівництва в результаті аналізу альтернативного шляху не

допускають перевищення цих критеріїв – локального руйнування несучих конструкцій не допускають, за винятком видаленої конструкції. У випадку розгляду сучасних будівель допускають перевищення окремих критеріїв – припускають локальне руйнування несучих конструкцій, що не призводить до непропорційного обвалення. Величина допустимого локального обвалення в разі зовнішнього видалення

складає 15 % загальної площі перекриття і 30 % – внутрішнього видалення. При цьому слід зазначити, що в попередній редакції GSA2003 допускали локальне руйнування і для нового будівництва, і для існуючих будівель. Величина допустимого обвалення складала 167 та 334 м² для зовнішнього та внутрішнього видалення відповідно. Це свідчить про встановлення більш жорстких вимог на сучасному етапі.

Таблиця 2

Порівняння варіантів моделювання прогресуючого обвалення методом альтернативного шляху, за GSA 2016

Параметр	Лінійна статика	Нелінійна статика	Нелінійна динаміка
Обмеження використання	до 10 поверхів; регулярність конструктивної схеми	відсутні	відсутні
Моделювання	тривимірне моделювання	тривимірне моделювання; додаткові вимоги до жорсткісних характеристик	тривимірне моделювання; додаткові вимоги до жорсткісних характеристик
Навантаження	застосування підвищувального коефіцієнта на ділянки підлоги над видаленим елементом (коефіцієнт динамічності)*	застосування підвищувального коефіцієнта на ділянки підлоги над видаленим елементом (коефіцієнт динамічності)**; не менше 10 кроків завантаження	поступове завантаження моделі, рівновага системи, раптове видалення несучого елемента за час менший, ніж 1/10 періоду коливань вертикального руху конструкцій над видаленим елементом, що визначений із моделі без видаленого елемента

Примітки: * Коефіцієнт залежить від двох випадків навантажень, виду конструктивної схеми, матеріалу несучих конструкцій, вимоги ухвалення рішення.

** Коефіцієнт залежить виду конструктивної схеми, матеріалу несучих конструкцій, вимоги ухвалення рішення.

UFC 4-023-03. Положення UFC 4-023-03 [10] є близькими до GSA 2016 [0], за винятком деяких суттєвих відмінностей. Мета застосування цього документа – забезпечення необхідних вимог для зменшення вірогідності виникнення прогресуючого обвалення будівель Міністерства оборони США, які зазнають локальних пошкоджень через неперед-

бачувані події. Вимоги цього документа є обов'язковими для нового будівництва будівель поверховістю три і більше. Залежно від завдання цей документ може бути застосований для існуючих будівель.

Відповідно до загальних положень встановлено, що зазвичай непрактично проєктувати будівлю, щоб протистояти загальному руйнуванню, спричиненому

аномальними навантаженнями, що діють безпосередньо на велику її частину. Проте можна спроектувати будівлю так, щоб обмежити наслідки локальних руйнувань і запобігти або максимально зменшити прогресуюче обвалення всієї будівлі чи її значної частини. Встановлені вимоги для проектування забезпечують певні запобіжні заходи з умови, коли причина початкового руйнування і ступінь початкового пошкодження невідомі.

У цьому документі за основу приймають два загальних підходи для зменшення вірогідності прогресуючого обвалення, що визначені в ASCE 7-22 [8]:

прямі і непрямі методи. Прямі підходи включають явне врахування стійкості до прогресуючого обвалення під час процесу проектування – це методи альтернативного шляху та специфічного локального опору. Вимоги до аналізу альтернативного шляху в цілому повторюють прийняті в GSA2016 [1] (табл. 2). У непрямих методах стійкість до прогресуючого руйнування розглядають неявно через забезпечення мінімальних рівнів міцності, безперервності та пластичності (метод зв'язувальних сил). Використання кожного методу залежить від рівня ризику будівлі.

Згідно з п. 2-2 [10] для будівель встановлено вимоги залежно від категорій ризику:

- I категорія ризику – додаткові вимоги не встановлено;
- II категорія ризику – варіант 1: метод зв'язувальних сил для всієї будівлі та метод специфічного локального опору для кутових і передостанніх колон і стін на першому поверсі; варіант 2: метод альтернативного шляху для визначених місць видалення колон і стін;
- III категорія ризику – метод альтернативного шляху для визначених місць видалення колон і стін і метод специфічного локального опору по всьому периметру для колон і стін першого поверху;
- IV категорія ризику – метод зв'язувальних сил і метод альтернативного шляху для визначених місць видалення колон і стін, а також метод специфічного локального опору по всьому периметру для колон і стін першого поверху.

Вибір елемента, що видаляють за методом альтернативного шляху, не залежить від рівня ризику, а характеризується його геометричним розміщенням (приймають, що елемент видаляють у межах одного поверху):

- зовнішні колони, а також колони, де змінюється геометрія будівлі, – для першого поверху вище позначки землі, для поверху під покриттям, поверху на середній висоті, поверху, де змінюється розмір колони;

- внутрішні колони – лише для поверхів із неконтрольованою громадською зоною, наприклад паркінги;

- зовнішні стіни, а також стіни, де змінюється геометрія будівлі, – для першого поверху вище позначки землі, для поверху

під покриттям, поверху на середній висоті, поверху, де змінюється розмір стіни;

- внутрішні стіни – лише для поверхів із неконтрольованою громадською зоною, наприклад паркінги.

Відповідно до п. 3-2.10 [10] у результаті аналізу альтернативного шляху (видалення несучого вертикального елемента) встановлено критерії ухвалення рішення щодо решти конструкцій будівлі, за якими не допускають перевищення цих критеріїв – локального руйнування несучих конструкцій не допускають, за винятком видаленої конструкції.

Порівняльна характеристика вимог закордонної нормативної бази щодо прогресуючого обвалення. Загалом поточні редакції нормативних документів

містять схожі положення. Передусім це підходи для зменшення вірогідності прогресуючого обвалення, кожен із нормативних документів регламентує деякі або всі підходи. Метод альтернативного шляху як основний метод визначення стійкості до прогресуючого обвалення зустрічається у всіх нормах, вимоги до такого розрахунку схожі в GSA 2016 і UFC 4-023-03. У табл. 3 виконано порівняльний огляд ключових положень.

Висновки. Поточні редакції закордонних нормативних документів щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення містять схожі положення, зокрема близькими за змістом є американські нормативні документи. Передусім це підходи для зменшення вірогідності прогресуючого обвалення, кожен із нормативних документів регламентує деякі або всі підходи.

Таблиця 3

Порівняння ключових параметрів закордонних нормативних документів щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обваллення

Параметр	EN 1991-1-7:2006	GSA 2016	UFC 4-023-03
Призначення нормативного документа	усі будівлі на території Єврокodu	будівлі федерального уряду США	будівлі Міністерства оборони США
Характеристики будівлі до визначення вразливості до ПО	залежно від призначення будівлі	нові та існуючі будівлі, поверховістю 4 і більше	нові будівлі, поверховістю 3 і більше (допускають застосовувати для існуючих будівель залежно від завдання)
Категорії будівель	класи за наслідками руйнування: I, 2a, 2b, 3	рівні безпеки: I, II, III, IV, V	категорії ризику: I, II, III, IV
Допустимі початкові пошкодження	15 % площі перекриття, але не більше 100 м ²	для нових будівель – не допускають; існуючих будівель – у разі зовнішнього видалення складає 15 % загальної площі перекриття і 30 % – внутрішнього видалення	не допускають
Прийнятні підходи	метод альтернативного шляху; метод специфічного локального опору; метод зв'язувальних сил	метод альтернативного шляху	метод альтернативного шляху; метод специфічного локального опору; метод зв'язувальних сил
Реалізація методу альтернативного шляху	не вказано	лінійна статика; нелінійна статика; нелінійна динаміка	лінійна статика; нелінійна статика; нелінійна динаміка
Елемент, що видаляють за МАШ	колона; дільника стіни; балка	колона; дільника стіни	колона; дільника стіни
Розташування видаленого елемента за МАШ	на кожному поверсі	залежно від рівня захисту: рівень III та IV – зовнішні елементи на першому поверсі від землі та всі елементи (внутрішні та зовнішні) у підземних парковках, навантажувальних майданчиках і зонах неконтрольованого громадського доступу; рівень V – видаляють внутрішні і зовнішні елементи на кожному поверсі	не залежить від рівня ризику, а характеризується геометричним розміщенням: зовнішні колони і стіни, а також колони та стіни, де змінюється геометрія будівлі, – для першого поверху вище позначки землі, для поверху під покриттям, поверху на середній висоті, поверху, де змінюється розмір колони; внутрішні колони і стіни – лише для поверхів з неконтрольованою громадською зоною, наприклад паркінги

Метод альтернативного шляху як основний метод явного визначення стійкості до прогресуючого обвалення зустрічається у всіх нормах. Параметри до його реалізації сповна наведені у GSA 2016 і UFC 4-023-03.

Мінімальні характеристики будівель для врахування прогресуючого обвалення з проектуванням базовані не лише на основі категорії будівлі (рівня ризику, категорії ризику), а і додаткових параметрів, таких як поверховість, призначення будівлі, нове будівництво чи реконструкція.

Критерії визначення прогресуючого обвалення в цілому характеризуються критеріями ухвалення рішення щодо решти конструкцій будівлі в результаті явного врахування стійкості до прогресуючого обвалення (моделювання процесу прогресуючого обвалення). Критерії розрізняються в нормативних документах, однак переважно не допущено перевищення цих критеріїв – локального руйнування несучих конструкцій не допускають, за винятком видаленої конструкції.

Список використаних джерел

1. General Service Administration. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance. 2016. URL: https://www.gsa.gov/system/files/Progressive_Collapse_2016.pdf.
2. Starossek U. Progressive collapse of structures, Second edition. Westminster, London: ICE Publishing; 2017. <http://dx.doi.org/10.1680/pcos.61682>.
3. Elkady N., Augustus Nelson L., Weekes L., Makoond N., Buitrago M. Progressive collapse: Past, present, future and beyond. Structures, 2024. Vol. 62.
4. Caredda G., Makoond N., Buitrago M., Sagaseta J., Chryssanthopoulos M., Adam J.M. Learning from the progressive collapse of buildings. *Developments in the Built Environment*. 2023. Vol. 15. <http://dx.doi.org/10.1016/J.DIBE.2023.100194>.
5. Вабіщевич М. О., Фесун І. К. Підходи щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель та споруд. Сучасний стан та перспективи. *Онір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник*. Київ: КНУБА, 2023. Вип. 110. С. 256-263.
6. Adam J. M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. P. 122–149. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.082>.
7. Lew H. Best practices guidelines for mitigation of building for progressive collapse. 2003.
8. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-7:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи (EN 1991-1-7:2006, IDT). Чинний 01.01.2014. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 94 с.
9. ASCE 7-22. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.
10. Department of Defense (DoD). UFC 4-023-03: Design of buildings to resist progressive collapse. 2016. URL: <http://dod.wbdg.org/>.

Фесун Ігор Костянтинович, аспірант кафедри будівельної механіки, Київський національний університет будівництва і архітектури. ORCID iD: 0000-0002-6678-9900. Тел.: +38 (098) 785-55-49. E-mail: fesuni99@gmail.com.

Fesun Ihor, postgraduate student of the Department of Structural Mechanics, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-6678-9900. Tel.: +38 (098) 785-55-49. E-mail: fesuni99@gmail.com.

Статтю прийнято 12.12.2024 р.

УДК 621.874+621.86.01

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГОЛОВНИХ БАЛОК МОСТОВИХ КРАНІВ ІЗ ПОПЕРЕДНЬОЮ НАПРУГОЮ

Кандидати техн. наук А. В. Ткачов, О. А. Ткачов, С. В. Мироненко

MATHEMATICAL MODEL OF HEAD BEAMS OF BRIDGE CRANES WITH PRESTRESS

PhD. (Tech.) A. V. Tkachev, PhD. (Tech.) O. A. Tkachev,
PhD. (Tech.) S. V. Myronenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320889>

Анотація. У статті розглянуто питання, пов'язані з напружено-деформованим станом попередньо напруженого кранового моста. Мета роботи полягає в розробленні нової математичної моделі головної балки кранів мостового типу, яка дає можливість дослідити її напружено-деформовану поведінку за сумісної дії на балку вертикального рухомого навантаження, статичного навантаження від ваги самої балки та осьового ексцентричного навантаження.

Наведена нова математична модель базована на загальній теорії стійкості пружних систем, за розроблення якої були враховані реальні умови конструктивного виконання кранового моста. Отримані рівняння кривої прогинів цієї балки дали змогу провести дослідження та проаналізувати головні критерії працездатності вантажопідійомних машин – статичну жорсткість і статичну міцність – залежно від співвідношення поперечних сил, що діють на балку.

Отримані у статті результати можна в подальшому використати для проектування та модернізації кранів із метою підвищення їхньої вантажопідійомності, збільшення терміну їхньої служби без демонтажу, а також для вдосконалення чинних інженерних методів розрахунку як на стадіях проектування, так і в умовах реальної експлуатації.

Ключові слова: критерії працездатності, несуча здатність, попереднє напруження, крановий міст, статична жорсткість, динамічна жорсткість, деформаційний стан.

Abstract. This paper examines issues related to the stress-strain state of a prestressed crane bridge. The purpose of the work is to develop a new mathematical model of the main girder of bridge-type cranes, which allows for investigating its stress-strain behavior under the simultaneous action of a vertical moving load, a static load from the weight of the girder itself, and an axial eccentric load. The main challenge lies in accurately accounting for these different forces, which act on the structure in complex ways, especially when considering the variable nature of the loads involved in crane operations.

The presented new mathematical model is based on the general theory of stability of elastic systems, during the development of which the real conditions of the crane bridge construction were taken into account. In particular, the model reflects the effects of prestressing, which significantly influences the behavior of the bridge under load, as well as the geometric and material properties of the girder. The model also accounts for various factors, including the distribution of forces along the length of the girder, the effects of eccentric loading, and the impact of moving loads, which can cause dynamic responses that complicate the analysis.

The obtained equations of the deflection curve of this beam made it possible to conduct research and analyze one of the main performance criteria of lifting machines – static stiffness and static strength, depending on the ratio of longitudinal and transverse forces acting on the beam. By studying these parameters, it is possible to determine how the crane's structure will respond to different loading scenarios, ensuring that the crane can perform its intended functions safely and efficiently.

The results obtained in this work can be used in the future in the design and modernization of cranes to increase their load capacity, extend their service life without dismantling, and improve the existing engineering calculation methods at both the design stage and in real operation conditions. This research also opens the door to developing more advanced models for even greater accuracy in crane design.

Keywords: *performance criteria, bearing capacity, prestressing, crane bridge, static stiffness, dynamic stiffness, deformation state.*

Вступ. Удосконалення та активний розвиток сучасного виробництва потребує негайного застосування і впровадження новітніх наукових розробок та інженерних рішень. У зв'язку з цим розглянуто актуальні для машинобудівної галузі питання, пов'язані з підвищенням міцності та надійності рухомих і стаціонарних прогонових будов. Одним із таких напрямів для позитивного вирішення зазначених завдань є застосування прогонових конструкцій із попередньою напругою [1], у яких до початку [2] або під час експлуатації [3] штучно створюють внутрішні зусилля, протилежні за знаком робочим. До конструкцій, що розглядають, можна віднести прогони мостів [4], підкранові балки [5], кранові стріли [6], вежі [7], які широко застосовують у різних галузях промисловості [8]. Подібні пристрої мають підвищену несучу здатність [9], зменшену вагу [10], знижене енергетичне споживання як самих механізмів [11], так і всієї конструкції в цілому [12].

Відомо [13], що в робочій площині попередньо напруженої балки поздовжні стискальні зусилля впливають на балку ексцентрично. У результаті цього стріла прогину прогонової будови значно відхиляється від прямої форми [14], що може супроводжуватися порушенням сполучених із нею вузлів і механізмів [15], перекосом кінцевих балок [16] і пробуксуванням ходових коліс вантажного візка [17]. В окремих випадках підвищена

деформованість прогонової частини збільшує енергетичні витрати механізмів пересування внаслідок постійного руху вантажного візка для подолання створеного ухилу вантажного поясу на підйом [18].

Отже, особливу увагу необхідно приділяти визначенню і аналізу розрахункових і робочих деформацій прогонових будов для їх проектування та експлуатації. У зв'язку з цим насамперед слід проаналізувати і дослідити статичну та динамічну жорсткості мосту, оскільки ці два фактори є одними з основних критеріїв працездатності попередньо напружених прогонових будов, що є метою цієї статті. Перелічені вище завдання можуть бути позитивно вирішені з розглядом уточненої математичної моделі прогонової балки, у якій характер навантаження мосту, розрахункова та реальна схеми максимально наближені до конструктивної форми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд проведених публікацій показує, що для прогонових балок із різними способами створення в них попередньої напруги було проведено велику кількість досліджень щодо основних критеріїв працездатності [19]. Ряд робіт був присвячений чисельному моделюванню подібних конструкцій [20], а також глибокому аналізу деформованого стану балки за різних співвідношень величин поперечного та поздовжнього навантажень [21]. Після цього проаналізовано поведінку напружено-деформованого стану

досліджуваних математичних моделей за довільного положення рухомого робочого навантаження по довжині прогону.

Особливий інтерес мають роботи, пов'язані з розрахунком прогину попередньо напруженого кранового мосту [22], і дослідження його статичної жорсткості у двох площинах – головній [23] і площини підвісу вантажу [24]. Залежно від величини поздовжнього ексцентриситетно-стискального зусилля були визначені оптимальні прогини та вигини балки у вертикальній площині за довільного положення вертикального рухомого навантаження [25].

Є роботи, у яких у традиційних розрахункових схемах попередньо напруженого кранового мосту враховували зміну геометричних характеристик його перерізу вздовж прогону [26], що дало змогу максимально наблизити розрахункову схему головної балки до реальних умов її конструктивного виконання і відповідно підвищити точність результатів отриманих розрахунків залежно від розташування рухомого робочого навантаження.

Унаслідок аналізу публікацій було встановлено, що напружено-деформований стан навантажених мостів розраховували за спрощеними схемами математичних моделей прогонової балки, у яких дію навантажень на балку у вертикальній площині оцінювали лише за рухомою робочою силою, залежною від вантажопідйомності крана. Спільний вплив робочого рухомого та нерухомого статичного навантажень у роботах не розглядали. У деяких випадках припускали, що невеликі зміни величини навантаження незначно впливають на деформацію мосту і напруги [27]. У той же час реальні прогини кранового мосту слід обов'язково визначати для спільної дії на балку сили тиску ходового колеса вантажного візка та власної ваги балки.

З іншого боку, для проектування звичайних кранових мостів нерухоме статичне навантаження прогонової будови

від ваги балки може бути орієнтовно оцінено за графіками або відповідними коефіцієнтами. Його вважають однією зі складових усіх вертикальних сил, що одночасно діють на балку [28], що в ряді випадків призводить до необґрунтовано завищених запасів його статичної або динамічної жорсткості [29].

Для нашого випадку подібний підхід неможливий, оскільки попередньо напружені балки не належать до систем, для яких застосований принцип суперпозиції. Невеликий ексцентриситет у додатку поздовжнього навантаження або невелике відхилення балки від прямої форми можуть мати істотний вплив на її прогин і напруги, що виникають. У зв'язку з цим поведінка напружено-деформованого стану прогонової будови може бути оцінена некоректно або помилково. Отже, вплив поздовжньої сили на поведінку попередньо напруженого мосту може бути досліджений шляхом розгляду кривої прогинів балки, для чого потрібне розроблення та розгляд іншої математичної моделі, у якій будуть ураховані зазначені вище питання.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета роботи полягає в додатковому дослідженні статичної та динамічної жорсткості напружено-деформованого стану попередньо напруженої балки, де характер дії вертикальних навантажень на крановий міст має бути максимально наближеним до реальної схеми його навантаження.

Для досягнення позитивних результатів слід вирішити такі завдання: розглянути і проаналізувати вже відомі математичні моделі, де застосовано попередню напругу; розробити уточнену математичну модель прогонового крана, де характер дії навантажень на крановий міст максимально наближений до реальної схеми навантаження; проаналізувати одержані результати.

Основна частина дослідження. Розробляючи математичну модель, було прийнято припущення: вигин балки, що

спирається на ідеальні шарніри, відбувається у вертикальній площині пружної області роботи матеріалу балки. Розрахункова схема мосту подана на рис. 1, де l – довжина прогону балки; c – відстань від правої опори балки до рухомої вертикальної сили F , величина якої залежить від вантажопідйомності крана; q – розподілене завантаження від ваги балки; e – ексцентриситет додаток осьового навантаження S ; x – поточна координата

місця визначення прогину f балки; I – момент інерції перерізу мосту у вертикальній площині; E – модуль пружності матеріалу, з якого виготовлено балку.

Для спрощення позначаючи через EI жорсткість балки зі згинанням у площині підвісу вантажу $\frac{S}{EI} = k^2$, запишемо диференціальні рівняння кривої прогинів для лівої та правої частин балки:

$$\frac{d^2 f}{dx^2} + k^2 f = -\frac{x}{2EI} (2Fc + ql(l-x)) + k^2 e,$$

$$\frac{d^2 f}{dx^2} + k^2 f = -\frac{l-x}{2EI} (qlx + 2F(l-c)) + k^2 e.$$

Повний інтеграл цих рівнянь

$$f = C_1 \cos kx + C_2 \sin kx + [e - \frac{Fcx}{lS} - \frac{q}{S} (\frac{2+k^2x(l-x)}{2k^2})],$$

$$f = C_3 \cos kx + C_4 \sin kx + [e - \frac{F(l-c)(l-x)}{lS} - \frac{q}{S} (\frac{2+k^2x(l-x)}{2k^2})].$$

Постійні інтегрування C_2, C_4 знаходимо з умов безперервності деформацій для переходу з однієї ділянки

прогону на іншу – у місці дії сили F , а C_1, C_3 з умов закріплення балки на опорах:

$$C_1 = \frac{q}{k^2 S} - e,$$

$$C_2 = \frac{F \sin kc}{kS \sin kl} + (\frac{q}{k^2 S} - e) \operatorname{tg} \frac{kl}{2},$$

$$C_3 = \frac{F \sin k(l-c)}{kS} + (\frac{q}{k^2 S} - e) (\frac{1 - \operatorname{tg}(0,5 kl) \sin kl}{\cos kl}),$$

$$C_4 = -\frac{F \sin k(l-c)}{kS \operatorname{tg} kl} + (\frac{q}{k^2 S} - e) \operatorname{tg} \frac{kl}{2}.$$

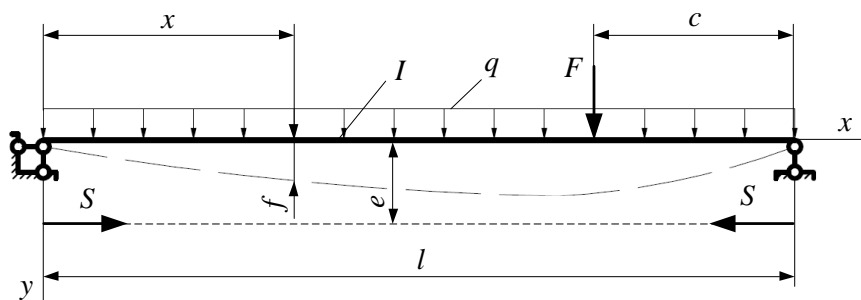


Рис. 1. Розрахункова схема мосту

Після нескладних перетворень отримуюмо рівняння для двох ділянок кривої

прогинів попередньо напруженої прогонової будови.

Для ділянки $0 \leq x \leq (l-c)$

$$f = (\cos kx + \sin kx \operatorname{tg}(kl/2) - 1) \left(\frac{q}{k^2 S} - e \right) + \frac{F}{S} \left(\frac{\sin kc \sin kx}{k \sin kl} - \frac{cx}{l} \right) - \frac{qx}{2S} (l-x),$$

ділянки $x \geq (l-c)$

$$f = (\cos kx + \sin kx \operatorname{tg}(kl/2) - 1) \left(\frac{q}{k^2 S} - e \right) + \frac{F}{S} \left(\frac{\sin k(l-c) \sin k(l-x)}{k \sin kl} - \frac{(l-c)(l-x)}{l} - \frac{qx}{2S} (l-x) \right).$$

Отже, отримано рівняння для визначення прогину в місці прогонової балки, що цікавить нас, за довільного положення тимчасового навантаження на мосту. Наведені вище рівняння зручні тим, що деформації мосту можуть бути визначені як за спільної дії на неї всіх вертикальних і горизонтальних сил, так і роздільної дії рухомого та нерухомого навантажень. За необхідності визначають вплив поздовжньої сили S на величину прогину тільки від тимчасового навантаження F , для чого приймають у виразах нульове значення розподіленого навантаження від ваги балки, тобто $q=0$. В іншому випадку, за необхідності визначення деформації тільки

від ваги балки, у наведених виразах приймають $F=0$.

Зазначимо, що несучу здатність конструкції оцінюють діючими в ній напругами. Диференціюючи двічі отримані рівняння прогинів, отримаємо вирази, за якими можуть бути визначені значення згинальних моментів M у довільному перерізі

$$M = -EI \left(\frac{d^2 f}{dx^2} \right).$$

Тоді для ділянки $0 \leq x \leq (l-c)$ момент у площині підвісу вантажу

$$M = (\cos kx + \sin kx \operatorname{tg} \frac{kl}{2}) \left(\frac{q}{k^2} - eS \right) + \frac{F \sin kc \sin kx}{k \sin kl} - \frac{q}{k^2},$$

ділянки $x \geq (l-c)$

$$M = (\cos kx + \sin kx \operatorname{tg} \frac{kl}{2}) \left(\frac{q}{k^2} - eS \right) + \frac{F \sin k(l-c) \sin k(l-x)}{k \sin kl} - \frac{q}{k^2} /.$$

Отже, отримано вирази, за допомогою яких можна дослідити напружено-деформований стан прогонової частини попередньо напруженої будови, а також провести розрахунки на міцність основних критеріїв працездатності – статичної і втомної міцності, статичної і динамічної жорсткості і загальної стійкості.

Результати досліджень. Отримані вирази дали змогу провести математичні дослідження деформованого стану попередньо напруженої балки, за яку було прийнято двотавр із номером профілю 24М, ексцентриситетом $h = 200$ мм, прогоном $l = 10,5$ м. Значення вертикальних поздовжніх навантажень були прийняті за рекомендаціями для зазначеного прогону вантажопідйомності мостових кранів – 0,5, 0,63, 1,0 т. Результати розрахунку кранової металевої конструкції наведено в таблиці, а частина з них – на рис. 2, 3. Деформації мосту подані як умовні прогини головної балки для групи режиму роботи 4К

$$\frac{f}{[f]}, \frac{f/l}{[f/l]}$$

з допустимим значенням умовного прогину $[f/l] = 2 \cdot 10^{-3}$ [31].

У таблиці в стовпчиках 3, 5, 7 наведено умовні прогини $f/[f]$ мосту за дії на балку у вертикальній площині тільки рухомого навантаження, значення яких були отримані автором статті в роботі [31]. У стовпчиках 4, 6, 8 наведені прогини у тих самих перерізах, але за спільної дії на балку рухомого та

стаціонарного нерухомого навантаження від ваги балки інтенсивністю q .

На рис. 2, 3 показано частину розрахованих стрілок прогинів балки, де цифрами 1...6 позначені деформації за рухомого вертикального навантаження вантажопідйомністю $F = 1$ т, цифрами 7...12 – за вантажопідйомності $F = 0,63$ т. Парними цифрами (2, 4, 6, 8, 10, 12) показано криві прогинів мосту за дії на балку рухомого та нерухомого навантажень, непарними (1, 3, 5, 7, 9, 11) – за дії лише вертикального рухомого навантаження.

Ураховано вплив поздовжньої сили S на напружено-деформовану поведінку прогонової балки у вертикальній площині. Криві прогинів мосту були отримані за співвідношення поздовжніх S і поперечних F сил, що діють на балку, у діапазоні

$$\frac{S}{F} = 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2.$$

Аналіз напружено-деформованого стану балки проводили відповідно до відомих двох найбільш несприятливих випадків навантаження попередньо напруженого мосту: знаходження рухомого вертикального навантаження F в середині прогону ($c = x = 0,5l$), де перевіряють розрахункові прогини; знаходження навантаження F над опорою або біля неї ($c = l, x = 0,5l$), де можливі зворотні вигини мосту.

Умовні прогини головної балки

$\frac{S}{F}$	Координата прогину f	Вантажопідйомність, t					
		0,5		0,63		1,0	
		F	F, q	F	F, q	F	F, q
1	2	3	4	5	6	7	8
1	$x = 0,5l$	0,38	0,399	0,58	0,61	0,96	1,02
	$x = 0$	-0,12	-0,08	-0,12	-0,08	-0,12	-0,08
1,25	$x = 0,5l$	0,36	0,38	0,55	0,58	0,92	0,97
	$x = 0$	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12
1,5	$x = 0,5l$	0,35	0,37	0,52	0,55	0,88	0,94
	$x = 0$	-0,20	-0,16	-0,20	-0,16	-0,20	-0,16
1,75	$x = 0,5l$	0,29	0,31	0,45	0,49	0,85	0,91
	$x = 0$	-0,25	-0,18	-0,25	-0,18	-0,25	-0,18
2	$x = 0,5l$	0,28	0,31	0,4	0,45	0,81	0,89
	$x = 0$	-0,3	-0,23	-0,3	-0,23	-0,3	-0,23

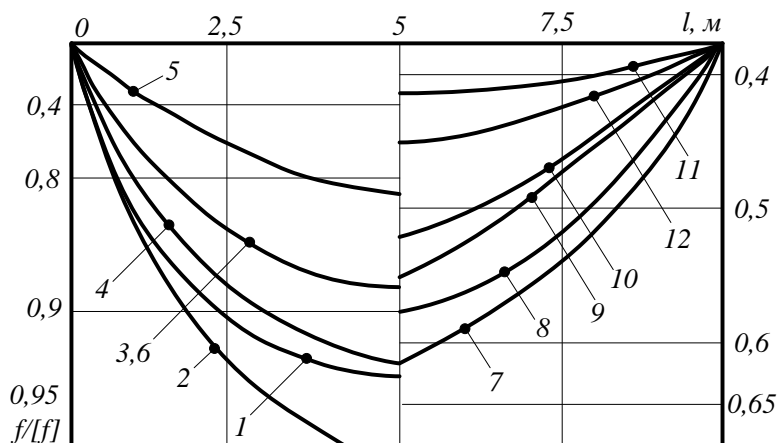


Рис. 2. Деформації балки та криві її прогинів

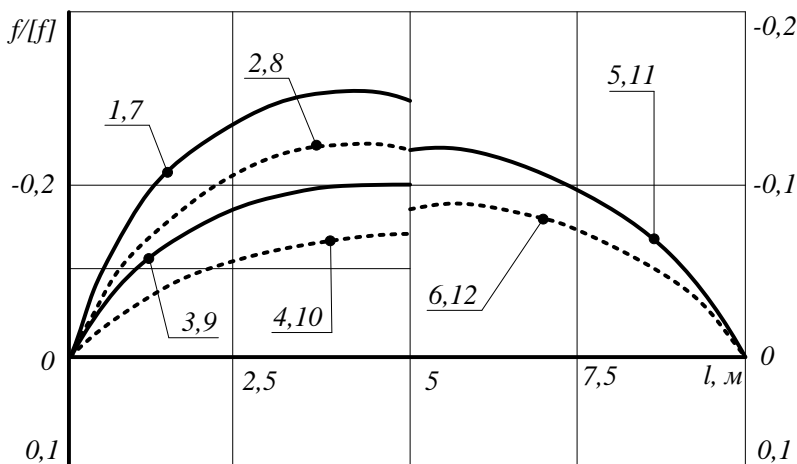


Рис. 3. Деформації балки та криві її прогинів за навантаження F

Аналізуючи в таблиці значення деформацій балки та криві її прогинів, подані на рис. 2, видно, що за співвідношення сил, які діють на балку, у зазначеному діапазоні розрахункові деформації мосту зростають від 5 до 10 % (рис. 2, криві 5, 6) порівняно з варіантом математичної моделі, де вагу балки не враховували. Пов'язано це з тим, що збільшення ексцентричної осьової сили суттєво впливає на величину прогинів балки у площині підвісу вантажу. Корисне для нас збільшення величини поздовжньої сили суттєво підвищує несучу здатність металеві конструкції, з одного боку, але з іншого – негативно впливає на стан мосту, збільшуючи його прогини за серединного положення тимчасового навантаження. Зазначимо, що зі збільшенням довжин прогонів крана прогини балки будуть тільки зростати.

Розглянуте питання слід обов'язково враховувати для проєктування головних балок мостових кранів із попередньою напругою, оскільки від нього залежить головне правило в кранобудуванні – забезпечення необхідної несучої здатності металевих конструкцій вантажопідйомних машин із дотриманням будь-яких безпечних режимів роботи, які можуть виникнути під час експлуатації.

На рис. 3 показані криві прогинів тієї самої балки для знаходження рухомого навантаження F над опорою ($c = l, x = 0,5l$), де нумерація кривих відповідає нумерації на рис. 2. Характер кривих логічно показує зменшення деформацій (криві 2, 4, 6, 8, 10, 12) порівняно з варіантом, де вагу балки не

враховували (криві 1, 3, 5, 7, 9, 11). Розрахункові вигини мосту при цьому знижуються на 5-8 %, що значно полегшує роботу металеві конструкції та виключає ряд зазначених вище недоліків. У той же час, як і в першому випадку навантаження, збільшення величини ексцентричної поздовжньої сили, а також довжини прогону мосту призводить до зростання вигину.

Висновки. У роботі розроблено математичну модель попередньо напруженої конструкції, що дає змогу досліджувати напружено-деформований стан мосту за спільної та роздільної дії на нього вертикальних рухомих і стаціонарних нерухомих навантажень з урахуванням впливу на балку ексцентричної поперечної сили.

Отримані авторами рівняння кривих прогинів (вигинів) головної балки мостового крана дали змогу проаналізувати її деформовану поведінку за співвідношення поздовжніх і поперечних сил, що діють на балку, у діапазоні

$$\frac{S}{F} = 1; 1,25; 1,5; 1,75, 2.$$

Результати можуть бути використані для вдосконалення методів розрахунку за проєктування прогонових балок мостових кранів. Крім того, наведені авторами рекомендації можуть бути використані для модернізації кранів із метою підвищення їхньої вантажопідйомності, а також збільшення терміну служби вантажопідйомної машини без демонтажу.

Список використаних джерел

1. Paez Pablo M., Sensale-Cozzano Beradi. Time-dependent analysis of simply supported and continuous unbounded prestressed concrete beams. *Engineering Structures*. Vol. 240 (2021). DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112376.
2. Jianqun W., Shenghua T., Zheng H., Zhou C., Zhu M. Flexural behavior of a 30-meter full-scale simply supported prestressed concrete box girder. *Appl. Sci.* 10(9), 30–76 (2020).
3. Kokhno V. Prestressing of reinforcement. Methods for creating prestress in reinforced concrete structures. *Appl. Sci.* 3(398), 18-21 (2022).

4. Lee D., Park M., Joo H., Han S., Kim K. Strengths of Thick Prestressed Precast Hollow-Core Slab Members Strengthened in Shear. *ACI Structural Journal*. 117(2), 129–139 (2020).
5. Losanno D., Simone Galano S., Parisi F. Influence of strand rupture on flexural behavior of reduced-scale prestressed concrete bridge girders with different prestressing levels. *Engineering Structures*. IF 5.5 (2023). DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117358.
6. Dustin Black. Prestressed Concrete Bridge Girders. *Structural Rehabilitation*. 2 (2021). URL: <https://www.structuremag.org/?p=17457>.
7. Hu L., Feng P. Prestressed CFRP-reinforced steel columns under axial and eccentric compression. *Compos. Struct*. 268 (2021).
8. Lee D., Han S. J., Ju H., Kim K. S. Shear strength of prestressed concrete beams considering bond mechanism in reinforcement. *ACI Structural Journal*. 118(3), 267-277 (2021). DOI: 10.14359/51730531.
9. Kang T., Lee D., Yerzhanov M. and Ju. H. ACI 318 Shear Design Method for Prestressed Concrete Members. *Concrete International*. 43(10), 42–50. (2021).
10. Bruwiler E. Improving the strength and performance characteristics of bridge structures using ultra-high-strength fiber-reinforced concrete. *Concepts and practical application*. *Road Power*, 48–51 (2020).
11. Naidenko E., Bondar O., Boiko A., Fomin O., Turmanidze R. Control Optimization of the Swing Mechanism. In: Tonkonogyi V., Ivanov V., Trojanowska J., Oborskyi G., Pavlenko I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes III*. InterPartner 2021. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham (2022).
12. Bonopera M., Chang K., Lee Z.-K. State-of-the-art review on determining prestress losses in prestressed concrete girders. *Appl. Sci*. 10, 72–57 (2020).
13. Tan M., Cheng W. Non-linear lateral buckling analysis of unequal thickness thin-walled box beam under an eccentric load. *Thin Walled Struct*. 139, 77–90 (2019).
14. Park M., Lantsoght E., Zarate Garnica G., Yang Y., Sliedrecht H. Analysis of shear capacity of prestressed concrete bridge girders. *ACI Struct J*. 118, 75-88 (2021).
15. Obernikhin D., Nikulin A. Experimental studies of deflections in bending reinforced concrete elements taking into account the influence of the shape of their cross-section. 151, 56-62 (2021).
16. Yao G., Xiong X. Quantitative study on deformation performance index of prestressed steel-concrete beams under bending. *Struct*. 43, 284-293 (2022). DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0784.
17. Han T., Liang S., Zhu X., Wang W., Yang J. Numerical analysis of vertical behavior of large-span prestressed steel reinforced concrete slab. *J. Southeast Univ*. 53, 218–228 (2023), DOI: 10.3969/i.issn.1001-0505.2023.02.000.
18. Shuai Fei, Ge Zhihao, Tong Yifei, Li Xiangdong. Characteristics analyses of energy consumption for bridge crane based on the energy flow. *IOP Conference Series Materials Science and Engineerin*. 758(1) (2020).
19. Sokolov S., Plotnikow D., Grachev, Lebedev V. Evaluation of loads applied on engineering structures based on structural health monitoring data. *International Review of Mechanical Engineering*. 14(2), 146-150 (2020). DOI: 10.15866/ireme.v14i2.18269.
20. Eisa A., Kotrasova K., Sabol P., Mihaliková M., Attia M. Experimental and numerical study of strengthening prestressed reinforced concrete beams using different techniques. *Appl. Sci*. 14(1) (2024).
21. Marcela Moreira da Rocha Almeida, Alex Sander Clemente de Souza, Augusto Teixeira de Albuquerque, Alexandre Rossi. Parametric analysis of steel-concrete composite beams prestressed with external tendons. *Journal of Constructional Steel Research*. 189 (2022).

22. Luna Vera O. S., Oshima Y., Kim C. W. Flexural performance correlation with natural bending frequency of post-tensioned concrete beam. Experimental investigation. *J. Civ. Struct. Health Monit.* 10, 135-151 (2020).
23. Han T., Liang S., Zhu X., Wang W. & Yang J. Numerical analysis of vertical behavior of large-span prestressed steel reinforced concrete slab. *J. Southeast Univ.* 53, 218-228 (2023). doi.org/10.3969/i.issn.1001-0505.2023.02.000.
24. Tkachev O., Tkachev A., Prokopovych I. Operation of pre-stressed span beams of bridge cranes taking into account load combinations. *Proceedings of Odessa Polytechnic University: Scientific, science and technology collected articles.* 1(65), 40-46 (2020).
25. Tkachev A., Tkachev O. The influence of the nature of the action of the external load on the stiffness of the main beams of bridge cranes. *Lifting and transport equipment.* 1 (62), 51-60 (2020).
26. Prokopovych A., Tkachev O., Tkachev P. The effect of variable cross-section of prestressed beams on the load-bearing capacity of the structure. *Proceedings of Odessa Polytechnic University: Scientific, science and technology collected articles.* 2(66), 16-23 (2022).
27. Tiancheng Han, Shuting Liang, Xiaojun Zhu, Wenkang Wang, Jian Yang. An investigation of the flexural behaviour of large-span prestressed and steel-reinforced concrete slabs. *Scientific Reports.* 1 (2023). doi.org/10.1038/s41598-023-37137-6.
28. Canestro E., Strauss A., Sousa H. Multiscale modelling of the long-term performance of prestressed concrete structures – Case studies on T-Girder beams: *Eng Struct.* Vol. 231 (2021).
29. Almeida M., Sander A., Clemente de Souza, Augusto Teixeira de Albuquerque, Alexandre Rossi A. Parametric analysis of steel-concrete composite beams prestressed with external tendons. *Journal of Constructional Steel Research.* 189 (2021). DOI:10.1016/j.jcsr.2021.107087.
30. Kaptelin S., Marchenko M. Prestressing of beam span structures. *Track and track management.* 9, 25-28 (2020).
31. Tkachev A., Tkachev O., Fomin O., Bondar O., Naidenko E. Influence of Horizontal Inertial Loads on the Operation of Overhead Crane Girders. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V Proceedings of the 5th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSVIE-2022, June 7-10, Poznan, Poland. Vol. 2: Mechanical and Chemical Engineering, Odessa, Ukraine.* P. 47-54 (2022).

Ткачов Анатолій Вікторович ^[0000-0002-2456-7533], кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Одеська політехніка». 0487265854. E-mail: tavgach@ukr.net.

Ткачов Олексій Анатолійович ^[0000-0002-4173-6175], кандидат технічних наук, Інститут машинобудування, Національний університет «Одеська політехніка». 0487265854. E-mail: tavgach@ukr.net.

Мироненко Сергій Володимирович ^[0000-0002-1597-1796], кандидат технічних наук, доцент, Одеський автомобільно-дорожній фаховий коледж, Національний університет «Одеська політехніка». 0487265854. E-mail: mirserg@ukr.net.

A. Tkachev^[0000-0002-2456-7533], PhD., Assoc. Prof., National University «Odesa Polytechnic». 0487265854. E-mail: tavgach@ukr.net.

O. Tkachev^[0000-0002-4173-6175], PhD., Institute of Mechanical Engineering, National University «Odesa Polytechnic». 0487265854. E-mail: tavgach@ukr.net.

S. Myronenko^[0000-0002-1597-1796], PhD., Odesa Automobile and Road Professional College of the National University «Odesa Polytechnic». 0487265854. E-mail: mirserg@ukr.net.

Статтю прийнято 12.12.2024 р.

УДК 624.1

ОСОБЛИВОСТІ ВЛАШТУВАННЯ ФУНДАМЕНТІВ НА ПІДТОПЛЕНИХ І ПОТЕНЦІЙНО ПІДТОПЛЮВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Канд. техн. наук О. І. Бондаренко, канд. геол.-мін. наук Г. Г. Стріжельчик,
канд. техн. наук І. В. Храпатова, аспіранти Є. П. Василенко, О. Є. Ляпін

FEATURES OF FOUNDATION ARRANGEMENT IN FLOODED AND POTENTIALLY FLOODED TERRITORIES

PhD (Tech.) O. I. Bondarenko, PhD (Geol.) G. G. Strizhelchik, PhD (Tech.) I. Khrapatova,
postgraduate student E. P. Vasylenko, postgraduate student O. E. Liapin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320679>

Анотація. Через збільшення глибини закладення фундаментів у разі будівництва підземних паркінгів і захисних укриттів почастишали випадки розкриття котлованами несподівано перезволожених ґрунтів м'якопластичної консистенції, хоча, за результатами інженерно-геологічних вишукувань, ґрунти знаходились у напівтвердому стані, і рівень ґрунтової води був зафіксований на глибині одного метра від дна майбутнього котловану. Тобто фактично змінилися властивості суглинистого ґрунту, який мав бути основою плитного фундаменту, і для продовження будівництва потрібно провести інженерну підготовку ґрунтової основи. Було запропоновано влаштування щебеневої подушки і гідроізоляцію фундаменту з використанням комплексної хімічно активної добавки «Навікон» проникної дії для захисту від ґрунтової води. Поєднання таких заходів дало змогу підвищити несучу здатність ґрунтової основи і одночасно відмовитися від стаціонарних дренажних споруд. Товщину подушки, кількість шарів, використання або невикористання вібраційного впливу за ущільнення подушки, кількість проходів тощо визначали на дослідній ділянці котловану, яка потім увійшла в склад загальної подушки. Як показали розрахунки та експериментальні ущільнення, малоповерхові споруди (двоповерхові) можна будувати на одношарових щебневих подушках до 30 см товщиною, оскільки тиск від вийнятого ґрунту можна порівняти з тиском від споруди. При цьому осадка споруд, навіть на слабких ґрунтах, практично не відбувається.

Для багатопверхових споруд (три і чотири поверхи) можна застосовувати двошарову щебенеvu подушку товщиною до 50 см: нижній шар – фракція 40-70 мм, верхній шар – фракція 20-40 мм.

Ключові слова: підтоплені території, інженерна підготовка, ґрунтові подушки.

Abstract. To address the challenges posed by unexpectedly waterlogged soils of soft-plastic and plastic consistency during the construction of underground parking lots and protective shelters, it is crucial to adopt effective foundation preparation methods. The most reliable approach involves the use of crushed stone cushions combined with formation drainage. However, the significant depth of the pits and the absence of gravity drainage often make this method impractical.

For low-rise buried structures, a crushed stone cushion up to 30 cm thick is sufficient. This thickness is effective because the mass of the excavated soil is comparable to the pressure exerted on the foundation's base. With a deformation modulus of 8-10 MPa, such a cushion ensures minimal settlement of structures, even on weak soils.

In the case of multi-storey buildings, a more robust solution is required. A two-layer crushed stone cushion, 50 cm thick, is recommended. The lower layer should consist of stones with a fraction size of 40-70 mm, while the upper layer should have a fraction size of 20-40 mm. After compaction, this cushion achieves a deformation modulus of 20-Additionally, the implementation of formation drainage systems, where feasible, can significantly enhance the effectiveness of these crushed stone cushions. These systems help manage water levels and prevent the accumulation of waterlogged soils, thereby maintaining the integrity and stability of the foundation over time.

In summary, while the preparation of foundations in waterlogged soils presents challenges, the strategic use of crushed stone cushions and formation drainage can provide effective solutions. For low-rise structures, a 30 cm thick cushion is adequate, whereas multi-storey buildings benefit from a two-layer cushion with a total thickness of 50 cm. These measures ensure that even in the presence of weak soils, the foundations remain stable and secure.

Keywords: flooded areas, engineering preparation, soil cushions.

Вступ. В останні роки через збільшення глибини закладення фундаментів у разі будівництва підземних паркінгів і захисних укриттів почастишали випадки розкриття котлованами несподівано перезволожених ґрунтів м'якопластичної консистенції [1], хоча, за результатами інженерно-геологічних вишукувань, ґрунти були напівтверді. Однією з причин такого явища може бути некоректне визначення рівня ґрунтових вод, який зазвичай стабілізується вище за відмітку появи води в розвідувальних свердловинах [2]. Часто не враховують висоту капілярного підняття води в ґрунті або межі максимальних коливань рівня ґрунтової води на період від виконання досліджень до початку будівництва [3].

Іноді з оцінюванням гідрогеологічних умов не виділяють території, що є потенційно підтоплюваними і не визначають фільтраційні характеристики ґрунтів за відсутності водоносного горизонту на момент проведення досліджень у складних інженерно-геологічних умовах [4-7].

У випадку, коли в котловані з'являється вода, роботи з улаштування фундаментів ускладнюються, доводиться проводити будівельне водозниження. Аналіз причин виникнення таких умов [7, 8], проведення геотехнічних досліджень і подальший моніторинг стану ґрунтів дають рекомендації з підвищення несучої здатності розуцільненої ґрунтової основи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш ефективним способом вирішення проблем із надмірним зволоженням верхнього шару ґрунту після розкриття котловану є улаштування щелебневих подушок разом із пластивим дренажем під плитним фундаментом [8]. Але частіше за все класичні варіанти дренажних споруд – променевий, кільцевий, вертикальний тощо [9-11] – не можуть бути застосовані через те, що процес осушення ґрунтової товщі дає активізацію суфозійних процесів, що послаблюють несучу здатність природної ґрунтової основи будівлі і навіть можуть призвести до утворення порожнин під фундаментом. Крім того, формується площинна зона депресії, тобто зниження рівня ґрунтової води на площі, яка значно перевищує площу споруди, що захищають, і призведе до зміни режиму ґрунтових вод на значній території.

Отже, урахувавши, що маємо справу з заглибленими фундаментами, доведеться улаштовувати примусове відведення дренажної води, через що значно подорожчає будівництво. Можливі перерви в енергопостачанні можуть призвести до аварійних ситуацій. Самопливне водовідведення дренажної води з глибоких котлованів практично неможливо.

Також, крім високих експлуатаційних витрат і енергозалежності, реалізація такого типу захисту передбачає виконання великого об'єму будівельних, насамперед

земляних, робіт, що за стиснених умов забудови та наявності розгалуженої системи підземних комунікацій значно ускладнює процес будівництва. Необхідно застосування спеціальної будівельної і бурової техніки, постійне технічне обслуговування дренажної системи.

Визначення мети та завдання дослідження. Виходячи з фактичного стану ґрунтової основи майбутнього фундаменту (м'якопластична консистенція, знижена несуча здатність ґрунтової основи, високий рівень ґрунтової води) і аналізу розглянутих досліджень і публікацій, можна сформулювати, що потрібно одночасно вирішити питання підвищення несучої здатності ґрунтової основи плитного фундаменту принаймні до показників природного ґрунту до початку надмірного зволоження і розуцільнення і захистити підземну частину споруди від агресивного впливу ґрунтової води. При цьому використання стаціонарної дренажної системи, окрім будівельного водозниження, не є прийнятним.

Основна частина дослідження. Фільтраційний вихід ґрунтової води, спрямований вгору, зважаючи дія води призводять до розуцільнення верхнього шару ґрунтової основи і викликає активізацію суфозійних процесів. Інколи навіть може призвести до появи водоносного горизонту типу «верховодки». Рівень ґрунтових вод у добре проникних ґрунтах встановлюється у свердловинах глибиною до 12 м протягом декількох годин після проходки свердловини. У слабо проникних ґрунтах для цього потрібно не менше доби, тому для прогнозування можливого підвищення рівня ґрунтової води і переходу будівельної ділянки в категорію підтопленої треба фіксувати встановлений рівень.

Оцінити потенційну підтопленість території можна за різницею вологості в підшві та покрівлі ґрунтового шару. Значна різниця означає, що навіть за незначної зміни природних умов – улаштуванні котловану з тривалою перервою в будівельних роботах, зливі опаді,

промерзання ґрунту, вплив порового тиску та зважуючої дії води і відсутність тиску видаленого ґрунту на дно котловану, дає розуцільнення і спучування ґрунтів, причому будівельне водозниження не вирішує цю проблему. Такий процес відбувається і в глинистих і в супіщаних ґрунтах, але по-різному: від 25 до 10 см.

За складних інженерно-геологічних умов підготовку ґрунтової основи фундаментів слід проводити різними методами [12]. На ділянках, де основу складають пилюваті піски, супіски та суглинки, ефективна двошарова щєбенева подушка, ущільнена без вібраційної дії з укочуванням. Товщина подушки буде визначена глибиною втискування щєбеню в розуцільнений ґрунт і прогнозом коливання рівня ґрунтової води, оскільки тиск від вийнятого ґрунту можна порівняти з тиском по підшві фундаменту. При цьому осадка споруд, навіть на слабких ґрунтах, практично не відбувається. Штампові випробування подушки товщиною до 30 см (нижній шар із фракції щєбеню 20-40 мм, верхній шар – 10-20 мм) в інтервалі навантажень 0,1-0,3 МПа показали модуль деформації 8-10 МПа, що є достатнім для малоповерхових споруд (рисунок).

Для багатоповерхових споруд також можна застосовувати двошарову щєбєневу подушку товщиною до 50 см: нижній шар – фракція 40-70 мм, верхній шар – 20-40 мм. Модуль деформації такої подушки після ущільнення становить 20-25 МПа.

Слід зазначити, що результати розрахунків осадки багатоповерхових будівель і подальші спостереження за осадками показали близькі значення – 22 і 23 см, але тривалість осідання склала майже рік через наявність у нижній частині ґрунтової основи шару слабо проникних суглинків.

Висновки. Ґрунтова основа фундаменту, яка зазнала зниження несучої здатності за рахунок зволоження і фільтраційного розуцільнення, може бути відновлена заходами інженерної підготовки,

а саме втисканням щебеневого шару в природний ґрунт без улаштування дренажних систем.



Рис. Штампові випробування подушки товщиною 30 см

Малоповерхові заглиблені споруди можна будувати на двошарових щебених

подушках до 30 см товщиною, оскільки тиск від вийнятого ґрунту можна порівняти з тиском по підшві фундаменту. Для багатоповерхових споруд можна застосовувати двошарову щебєневу подушку товщиною до 50 см.

Розрахункова осадка споруд, навіть на слабких ґрунтах, співпадає з фактичною – після ущільнення ґрунт під подушкою досягає природної щільності, при цьому з'являється ще вторинне зчеплення.

Слід зазначити важливу роль, яку виконують щебєневі подушки в зоні сезонних коливань рівня ґрунтової води і на територіях, що періодично підтоплюються, – подушка сприяє рівномірному розподілу напруг, пов'язаних із підніманням і зниженням рівня ґрунтової води.

Що стосується гідроізоляції підземної частини споруди, то використання комплексної хімічно активної добавки «Навікон» для захисту бетону від ґрунтової води дає довготривалий ефект, і можна застосовувати як із зовнішньої, так і внутрішньої поверхні. Крім того, можливий варіант внесення комплексної добавки безпосередньо для приготування бетонної суміші або за допомогою устаткування для торкретування поверхонь.

Список використаних джерел

1. Егунов В. Ю., Бондаренко А. И., Храпатова И. В. Особенности инженерно-геологических и гидрогеологических условий подтопленных территорий города Харькова. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХНУБА, 2013. № 73. С. 237-241.
2. ДБН В.1.1-45:2017. Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення. Київ: Мінрегіон України, 2017. 35 с.
3. ДБН В.1.1-25-2009. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 52 с.
4. Стрижельчик Г. Г. Концептуальные вопросы борьбы с подтоплением городских территорий. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 24–27.
5. Стрижельчик Г. Г., Єгунов В. Ю., Храпатова І. В., Сухов В. В. Інженерна геологія: навч. посіб. Харків: ХНУБА, 2017. 488 с.
6. Романюк Я. О., Чомко Д. Ф. Баражний ефект та ризики його виникнення в умовах урбанізованих територій. *The 9th International scientific and practical conference «Perspectives of contemporary science: theory and practice» (October 14-16, 2024) SPC “Sci-conf.com.ua”, Lviv, Ukraine*. 2024. P. 489. ISBN 978-966-8219-88-7 (дата звернення: 12.11.2024).

7. Строкаль В. П., Шевчук С. А. Затоплення та підтоплення територій: ризики для водної та продовольчої безпеки регіонального рівня. *Науково-практичний журнал. Екологічні науки.* № 4(49). С. 159-170. URL: <http://eco.j.dea.kiev.ua/archives/2023/4/21.pdf> (last access: 12.11.2024).
 8. Tabari H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Sci Rep* 10, 13768 (2020). URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2> (last access: 12.11.2024).
 9. Молікевич Р. С. Деякі аспекти новітнього підтоплення на Херсонщині. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки.* 27(2(41)). С. 45–66. URL: [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2022.2\(41\).268700](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2022.2(41).268700) (дата звернення: 12.11.2024).
 10. Винников Ю. Л., Коваленко В. І., Литвиненко Т. В. Моделювання міграції води в ущільненому глинистому насипу. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди.* 2014. Вип. 29. С. 525-531. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2014_29_74.
 11. A probabilistic assessment of urban flood risk and impacts of future climate change /Wen Liu, Qi Feng, Bernard A. Engel, Tengfei Yu, Xin Zhang, Yuguo Qian. *Journal of Hydrology.* Vol. 618, March 2023, 129267 (last access: 12.11.2024).
 12. Серікова О. М. Прогнозування і управління рівнем ґрунтових вод для підвищення екологічної безпеки забудованих територій України: дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2019. 166 с. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/10701/1/diss_Sierikova.pdf.
-

Бондаренко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-5640-6486. Тел.: +38(050) 6518773. E-mail: oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua.

Стріжельчик Геннадій Георгійович, кандидат геолого-мінералогічних наук, професор кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0009-0001-2053-3424. Тел.: +38 (050) 3004942. E-mail: hennadii.strizhelchuk@kname.edu.ua.

Храпатова Ірина Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-3404-5349. Тел.: +38 (050)4008157. E-mail: Iryna.Khrapatova@kname.edu.ua.

Василенко Євген Петрович, аспірант кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0009-0002-9747-3471. Тел.: +38(066) 0913060, 0977237520. E-mail: Yehen.Vasylenko@kname.edu.ua.

Ляпін Олександр Євгенович, аспірант кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0009-0007-4488-4599. Тел.: +38(098) 9435696. E-mail: oleksandr.liapin@kname.edu.ua.

Bondarenko Olexandr Ivanovych, PhD (Tech). Associate Professor of Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-5640-6486. Tel.: +38(050) 6518773. E-mail: oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua.

Strizhelchik Hennadii H., PhD (Geol.-Mineral). Professor, Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0009-0001-2053-3424. Tel.: +38 (050) 3004942. E-mail: hennadii.strizhelchuk@kname.edu.ua.

Khrapatova Iryna Viktorivna, PhD (Tech). Associate Professor of the Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O. M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy. ORCID ID: 0000-0003-3404-5349. Tel.: +38 (050) 4008157. E-mail: Iryna.Khrapatova@kname.edu.ua.

Vasylenko Yevhen Petrovych, postgraduate student of the Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O. M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy. ORCID ID: 0009-0002-9747-3471. Tel.: +38(066) 0913060, 0977237520. E-mail: Yehen.Vasylenko@kname.edu.ua.

Liapin Olexandr Yevhenovych, postgraduate student of the Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydrotechnical Construction, O. M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy. ORCID ID: 0009-0007-4488-4599. Tel.: +38(098) 9435696. E-mail: oleksandr.liapin@kname.edu.ua.

Статтю прийнято 13.12.2024 р.

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 528.4:332.3

ОЦІНКА ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК У СИСТЕМІ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ

Д-р екон. наук К. А. Мамонов, канд. екон. наук В. В. Гой,
д-р філософії Р. С. В'яткін, асп. В. С. Ковальчук

EVALUATION OF LAND USE USING THE METHOD OF EXPERT ASSESSMENTS IN THE SYSTEM OF TERRITORIAL DEVELOPMENT OF REGIONS

Dr. Sc. (Econ.) K. Mamonov, PhD (Econ.) V. Goi,
PhD (Tech.) R. Viatkin, postgraduate student V. Kovalchuk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320685>

Анотація. У статті встановлено, що сучасні напрями використання земель забезпечують необхідність формування кількісної основи ухвалення рішень у системі територіального розвитку регіонів. Для вирішення цього складного завдання особливе значення має застосування математичних методів оцінювання, зокрема експертного інструментарію. Запропоновано напрями застосування методу експертних оцінок для визначення територіального розвитку використання земель регіонів. Побудовано моделі експертного оцінювання та встановлено критерії визначення експертів у системі територіального розвитку.

Ключові слова: територіальний розвиток використання земель, оцінювання земель регіонів, критерії оцінювання, експертні методи, моделі оцінювання.

Abstract. It has been established that modern directions of land use provide the need to form a quantitative basis for decision-making in the system of territorial development of regions. To solve the presented complex task, the application of mathematical methods of assessment, in particular expert tools, is of particular importance.

The need to determine the directions and features of the assessment of the criteria for forming an expert group, the characteristics of their professional compliance with the implementation of projects implemented in the field of geodesy and land management, the use of geographic information systems has been proven.

The goal of the study has been achieved in terms of substantiating the directions and features of the application of expert analysis methods in the system of territorial development of regions.

In the context of the defined goal, the following tasks have been solved: determining the stages of applying expert analysis methods for the level of land use in the system of territorial development of regions; characteristics of the mathematical tools of expert analysis used to assess the level of land use.

The directions of application of the expert assessment method for determining the territorial development of land use of regions are proposed: making a decision to conduct a survey and forming the purpose of the survey within the framework of the project being implemented; developing the survey regulations; selecting experts; direct survey (questionnaire); analytical and computer analysis

of the information received; formation of conclusions based on the results of an expert survey based on the analysis of the information received. Expert assessment models were built and criteria for determining experts in the territorial development system were established. This allowed forming a quantitative basis for making decisions to increase the efficiency of land use in regions.

Keywords: territorial development of land use, regional land assessment, assessment criteria, expert methods, assessment models.

Вступ. Сучасні напрями використання земель забезпечують необхідність формування кількісної основи ухвалення рішень у системі територіального розвитку регіонів. Для вирішення цього складного завдання особливе значення має застосування математичних методів оцінювання, зокрема експертного інструментарію. Вони є одним із найпоширеніших методів прикладної математики в задачах використання земель, згідно з якими особа (або група осіб), яка ухвалює рішення, за результатами обробки думок досвідчених експертів формує обґрунтовану стратегію використання земель.

На жаль, за останні роки спостерігають зниження рівня застосування математичних методів для ухвалення рішень у системі використання земель регіонів, ефективності землекористування, гальмування можливостей виокремлення просторових, містобудівних, екологічних, інвестиційно-інноваційних, соціальних, безпекових і стейкхолдерних чинників. Оцінювання рівня використання земель дає змогу забезпечити їх прогнозування, створити умови здійснення геоінформаційного моніторингу, сформувавши рекомендації підвищення ефективності використання нерухомості.

Отже, тема дослідження застосування експертних методів оцінювання рівня використання земель у системі територіального розвитку регіонів є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Окремі теоретичні обґрунтування з визначення територіального розвитку використання земель регіонів, його структурних елементів подано в роботах [1–7].

Широкий спектр елементів законодавчого забезпечення не дав змогу сформувавши нормативне підґрунтя і виокремити чіткі напрями формування територіального розвитку використання земель регіонів. Крім того, на теоретичному рівні потребують удосконалення підходи до обґрунтування концептуальних положень територіального розвитку використання земель. Зокрема, деякі вчені фокусують увагу на теоретичних положеннях відносно формування категорії «розвиток» [8, 9].

Формування сучасної системи забезпечення територіального розвитку використання земель залежить від напрямів та особливостей здійснення управлінських дій, забезпечення взаємодії відповідних організаційних структур [10–12].

У сучасних наукових розробках особливу увагу приділено напрямам і особливостям формування і реалізації системи земельного адміністрування для забезпечення територіального розвитку використання земель [13, 14].

Для забезпечення територіального розвитку формують кількісну основу шляхом застосування оцінних процедур рівня використання земель [15, 16]. У роботах учених сфокусовано увагу на розробленні та застосуванні методу інтегральної оцінки рівня забезпечення територіального розвитку використання земель. Проте на недостатньому рівні визначено процеси формування інформаційно-аналітичного забезпечення на основі визначення локальних чинників використання земель із застосуванням експертних методів оцінювання.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є обґрунтування напрямів і особливостей

застосування методів експертного аналізу в системі територіального розвитку регіонів.

У контексті визначеної мети вирішують такі завдання:

- визначення етапів застосування методів експертного аналізу для рівня використання земель у системі територіального розвитку регіонів;

- характеристика математичного інструментарію експертного аналізу, застосовуваного для оцінювання рівня використання земель;

- розроблення напрямів оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів.

Основна частина дослідження. У системі використання земель, оцінювання рівня їх використання застосовують метод експертних оцінок, важливість якого визначена в роботах О. С. Петраковської, Н. Р. Беспалько, А. М. Третяк [17, 18].

Здійснюючи експертне оцінювання, необхідно застосовувати класичний сценарій, який передбачає такі етапи:

1. Ухвалення рішення про проведення опитування та формування мети опитування в рамках проекту, що реалізують.

2. Розроблення регламенту проведення опитування, а саме визначення кола питань, відповіді на які плановано отримати від експертів, і визначення форми подання відповідей на запитання – умовні градації, числа, ранжування.

3. Вибір експертів – залучення до опитування людей, які рівнем освіти, професійного досвіду, науковими здобутками, наявністю реалізованих проєктів відповідають заздалегідь визначеним вимогам.

4. Безпосереднє опитування (анкетування).

5. Аналітичний і комп'ютерний аналіз отриманої інформації.

6. Формування висновків за результатами експертного опитування на підставі аналізу отриманої інформації.

Ухвалює рішення про опитування та формування мети опитування в рамках

проєкту, що реалізують, ініціативна група або особа, яка ухвалює рішення (ОПР). На цьому етапі окреслюють основні завдання, які мають бути вирішені на підставі експертного оцінювання.

Розроблення регламенту опитування включає в себе перелік питань (Q_i , $i = \overline{1; n}$) і форму оцінювання:

- градація – якісна емоційна оцінка, наприклад, «незадовільно», «погано», «задовільно», «добре», «відмінно»;

- числова – подання відповідей у балах, наприклад, від 0 до 10 з визначенням переваг, наприклад, 0 – найгірша оцінка, 10 – найкраща;

- ранжування – розташування показників Q_i в анкеті за ступенем впливу (важливості).

Проводячи якісне, науково-обґрунтоване дослідження, перевагу надають числовій (бальній) оцінці, за якою можна виявити не лише переваги, але й ступінь впливу, з визначенням критеріїв для оцінювання:

- освіта і науковий рівень у сфері використання земель;

- стаж роботи у сфері використання земель;

- наукова діяльність у сфері використання земель;

- наявність реалізованих науково-дослідницьких проєктів;

- досвід роботи експертом у сфері використання земель;

- оцінка експерта на підставі взаємного оцінювання за методом списку;

- професійні нагороди та премії, сертифікати, що підтверджують кваліфікацію у сфері використання земель;

- оцінювання гнучкості мислення (дивергентне, багатоваріантне мислення);

- самооцінка ознайомлення з проблемою на теоретичному та практичному рівні у сфері використання земель;

- оцінювання участі в попередніх експертизах.

На підставі оброки документальної, тестової інформації та взаємного оцінювання n експертів будують матрицю оцінювання компетентності i -го експерта за j -м критерієм:

$$X^e = \begin{pmatrix} x_{11}^e & x_{12}^e & x_{13}^e & \dots & x_{1m}^e \\ x_{21}^e & x_{22}^e & x_{23}^e & \dots & x_{2m}^e \\ x_{31}^e & x_{32}^e & x_{33}^e & \dots & x_{3m}^e \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1}^e & x_{n2}^e & x_{n3}^e & \dots & x_{nm}^e \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де x_{ij}^e – оцінка компетентності i -го експерта за j -м критерієм, бал.

Зрозуміло, що група експертів неоднорідна, їхня компетентність у рамках проекту може принципово відрізнятися. Важливість думки кожного з експертів (або необхідність виключення претендента з експертної групи внаслідок відсутності необхідної компетентності) визначають за «вагою» кожного експерта всередині групи здобувачів:

- сума балів за всіма критеріями компетентності

$$X_k^e = \sum_{j=1}^m x_{kj}^e; \quad (2)$$

- середнє значення за сукупністю критеріїв

$$\bar{X}_k^e = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{kj}^e; \quad (3)$$

- нормований об'єктивний показник компетентності

$${}^n X_k^e = \frac{\sum_{j=1}^m x_{kj}^e}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}^e}. \quad (4)$$

Більш глибокий аналіз призводить до висновків, що визначення пріоритетів у компетентності експертів за формулами (2) – (4) не ураховує того факту, що не всі критерії є рівнозначними. Порівняння пріоритетів критеріїв компетентності для ефективного ранжування експертів (претендентів до експертної групи) можна проводити за методом аналізу ієрархій (МАІ).

Визначення пріоритетів – функція ініціативної групи (ОІР). Оцінювання парних порівнянь відповідно до шкали, запропонованої Т. Сааті, подано в таблиці. Необхідно усвідомити, якщо, порівнюючи пріоритети елементів A і B , отримуємо значення $p(A, B)$, то порівняння пріоритетів B і A відповідно набуває значення $p(B, A) = \frac{1}{p(A, B)}$.

Таблиця

Шкала парних порівнянь Т. Сааті [19–21]

Відносна важливість, бал	Визначення
1	Однакова важливість
3	Перший елемент трохи важливіший за другий
5	Перший елемент суттєво важливіший за другий
7	Перший елемент значно важливіший за другий
9	Перший елемент абсолютно важливіший за другий

На підставі заповненої матриці попарних порівнянь вектор пріоритетів

критеріїв $B = \{b_j\}$ ($j = \overline{1, m}$) розраховують за формулою

$$b_j = \frac{\prod_{k=1}^m p(k; j)}{\sum_{j=1}^m \prod_{k=1}^m p(k; j)}, \quad (5)$$

де $\prod_{k=1}^m p(k; j)$ – середнє геометричне за k -тим критерієм компетентності експерта.

На підставі заповненої матриці попарних порівнянь формують вектор пріоритетів критеріїв $B = \{b_j\}$, визначений за моделлю (5).

Урахування вектора пріоритетів (5), знайденого за методом аналізу ієрархій, дає змогу визначати компетентності кожного з експертів у такий спосіб:

$${}^*X_k^e = \sum_{j=1}^m b_j \cdot x_{kj}, \quad (6)$$

де x_{kj} – оцінка k -го експерта за j -м критерієм;

b_j – «вага» j -го критерію.

На підставі оцінювання компетентності експертів (6) проводять їх ранжування.

Точність експертного оцінювання безпосередньо залежить від кількісних показників експертних груп, адже зменшення кількості експертів може вплинути на зниження точності оцінок, а збільшення кількості експертів – до ускладнень, пов'язаних з організацією експертизи, збільшення термінів її проведення, навантаження з обробки її результатів. Традиційно пропонувано склад експертних груп від 10 до 150 осіб. Для реалізації конкретного проекту необхідно сформувати групу, яка б за кількісними показниками задовольняла умову

$$N_{min} \leq N \leq N_{max}, \quad (7)$$

де N_{min} , N_{max} – мінімальна та максимальна кількість експертів у групі.

Існує ряд способів оцінювання максимальної та мінімальної кількості експертів:

$$N_{max} \leq \frac{3}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{K_{max}}, \quad (8)$$

де $K_i = {}^*X_i^e$ – компетентність i -го експерта в групі з n експертів;

K_{max} – максимальне значення компетентності в групі;

$$N_{min} = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{\varepsilon} + 5 \right), \quad (9)$$

де ε – наперед задане значення середньої помилки опитування.

На підставі обмежень (7) – (9) деякі претенденти, узагальнений показник компетентності яких є найнижчим, можуть бути виключені зі складу експертної групи.

Етап безпосереднього опитування пропонуємо проводити у вигляді анкетування, де група з k експертів дає бальну оцінку за кожним з $(Q_i, i = \overline{1; n})$ запитань (показників). Залежно від «чутливості» показників можна вибирати шкалу від 0 до 5 балів, від 0 до 10 балів, від 0 до 20 балів і т. ін., за якою найвищу оцінку отримують «найвпливовіші» показники. За такого підходу різні показники можуть отримувати рівні бали, якщо, на думку експерта, їхній вплив є сумірним.

Попередню обробку результатів експертного опитування зазвичай проводять класичними методами математичної статистики за такими показниками:

- середнє арифметичне

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}; \quad (10)$$

- середнє геометричне

$$\bar{x}_j^g = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_{ij}}; \quad (11)$$

- мода M_o – найчастіша оцінка;
- медіана M_e – середнє значення;
- сума відхилень від середнього

$$\delta_j = \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i). \quad (12)$$

Зазвичай для встановлення причинно-наслідкових зв'язків у предметній сфері експертам важко визначити величину впливу кожного об'єкта, виражену числовою характеристикою, наданою кожним експертом окремо. Завдання ускладнено зі збільшенням кількості об'єктів дослідження (критеріями, показниками анкетування). Суттєво спрощує цю проблему можливість парного порівняння з виявленням пріоритетів. При цьому оцінка всієї сукупності об'єктів може бути надана на підставі парного порівняння всіх можливих пар об'єктів.

Результати парного порівняння всіх можливих пар об'єктів можна подати як матрицю переваг, розраховану для кожного

експерта. Елементи матриці переваг знаходять за правилом

$$p_{ij}^{(e)} = \begin{cases} 1; & \text{якщо } o_i > o_j \\ 0,5; & \text{якщо } o_i = o_j \\ 0; & \text{якщо } o_i < o_j \end{cases}, \quad (13)$$

де $e = \overline{1; k}$ – номер експерта;

$i, j = \overline{1; n}$ – номер об'єкта експертизи.

Групове оцінювання найефективніше здійснювати на підставі порівняння середньоарифметичних (10) або середньогометричних (11) значень оцінок, наданих кожним експертом.

Якщо, оцінюючи пари o_{ij} , k_i з загальної кількості експертів надали перевагу o_i над o_j , що відповідає оцінці $p_i = 1$, k_j експертів надали перевагу o_j над o_i ($p_j = 0$), а решта $k_l = k - k_i - k_j$ експертів вважають ці об'єкти рівноправними ($p_l = 0,5$), то оцінку математичного очікування дискретної випадкової величини $p_{ij}^{(e)}$ розраховують як

$$m_{ij} = M[p_{ij}^{(e)}] = p_i \cdot \frac{k_i}{k} + p_j \cdot \frac{k_j}{k} + p_l \cdot \frac{k_l}{k}. \quad (14)$$

Обчислені за правилом (14) елементи утворюють матрицю $M[n \times n]$, будь-яка пара елементів якої задовольняє умову

$$m_{ij} + m_{ji} = 1. \quad (15)$$

За елементами матриці математичного очікування для всіх об'єктів визначають ступінь відносної важливості, що виражено числовими коефіцієнтами.

Алгоритм визначення вектора відносної важливості $R^{im} = \begin{pmatrix} r_1 \\ \dots \\ r_n \end{pmatrix}$ подамо як ітераційну процедуру:
Початкова умова $t = 0$.

Початкові значення елементів вектора відносної важливості приймаємо рівними

$$\text{одиниці } R^{im(0)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Застосуємо рекурентні співвідношення

$$\lambda^{(t)} = G \cdot M \cdot R^{im(t-1)}, \quad (16)$$

де $G = (1 \quad 1 \quad \dots \quad 1)$;

$$R^{im(t)} = \frac{1}{\lambda^{(t)}} \cdot M \cdot R^{im(t-1)}, \quad (17)$$

елементи матриці $R^{im(t)}$ мають задовольняти умову нормування

$$\sum_{i=1}^n r_i^{(t)} = 1.$$

Ознака закінчення алгоритму впливає з умови

$$\|R^{im(t)} - R^{im(t-1)}\| < \varepsilon, \quad (18)$$

де ε – наперед задана точність ітераційної процедури.

Якщо матриця M невід’ємна та нерозкладна, то зі збільшенням порядку t ($t \rightarrow \infty$) – кількості ітерацій – величина $\lambda^{(t)}$ збігається до максимального власного числа матриці M . Це впливає з теореми Перрона-Фробеніуса і доводить збіжність поданого ітераційного алгоритму.

На основі методу експертного аналізу визначають локальні чинники територіального розвитку використання земель, зокрема на регіональному рівні. Питанням визначення та оцінювання територіального розвитку використання земель займаються автори робіт [6, 7, 22–24].

Узагальнюючи теоретичні положення, запропоновано напрями оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів:

- формування інформаційно-аналітичного забезпечення з територіального розвитку використання земель регіонів;

- виокремлення чинників, що впливають на забезпечення територіального розвитку використання земель;

- побудова багаторівневої системи показників оцінювання;

- застосування методів експертних оцінок і аналітичних методів для визначення локальних показників оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів;

- розроблення системної моделі оцінювання показників із застосуванням середньої геометричної;

- оцінювання системних функціональних, просторових, містобудівних, екологічних, інвестиційно-інноваційних, безпекових, соціальних, стейкхолдерних показників;

- розроблення інтегральної моделі оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель із застосуванням системних показників і вагових коефіцієнтів;

- оцінювання вагових коефіцієнтів із використанням методу аналізу ієрархій;

- визначення інтегрального показника рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів;

- інтерпретація отриманих результатів.

Висновки. Запропоновано напрями застосування методу експертних оцінок для визначення територіального розвитку використання земель регіонів. Побудовано моделі експертного оцінювання та встановлено критерії визначення експертів у системі територіального розвитку. Це дало змогу сформулювати кількісну основу ухвалення рішень для підвищення ефективності використання земель регіонів.

У результаті систематизації теоретичних підходів удосконалено понятійний апарат з визначення територіального розвитку використання земель регіонів, базований на сукупності системних ознак і характеристик і взаємопов’язаних функціональних, просторових, містобудівних, екологічних, інвестиційно-інноваційних, безпекових, соціальних, стейкхолдерних чинників, математичному інструментарії, сучасному інструментарії геоінформаційних систем, що дало змогу побудувати кількісну основу ухвалення обґрунтованих рішень відносно забезпечення територіального розвитку використання земель на регіональному рівні.

Запропоновано багаторівневу систему показників оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання

земель регіонів, базовану на локальних, системних чинниках, для визначення інтегрального показника й розроблення комплексного підходу.

Розроблено комплексний підхід для оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання

земель регіонів, базований на сукупності показників, методів і моделей, що дало змогу сформулювати кількісну основу для математичного моделювання й прогнозування чинників рівня забезпечення територіального розвитку використання земель.

Список використаних джерел

1. Трегуб М. В. Формування просторової інформації для державного земельного кадастру: монографія / Нац. гірн. ун-т. Дніпропетровськ: НГУ, 2014. 136 с.
2. Лихогруд О. М. Наукові підходи до визначення цінності земельних ресурсів містобудівних систем у ринкових умовах. URL: http://www.agrosvit.info/pdf/6_2016/13.pdf/.
3. Палеха Ю. М. Економіко-географічні аспекти формування вартості територій населених пунктів. Київ: Профі, 2006. 324 с.
4. Радзінська Ю. Б., Мамонов К. А. Дослідження стану та особливостей інвестиційної привабливості земель міст України. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 2017. Вип. 102. С. 125–129.
5. Mamonov K. Methodological approach to the integral assessment of the regional lands use territorial development. *Geodesy and Cartography*. 2019. Vol. 45. № 3. P. 110–115.
6. Mamonov K., Frolov V., Kondratyuk I., Kanivets O. Territorial development of land use in regions: conceptual provisions, problems and a methodological approach to assessment. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2020. Вип. 154. С. 154–158.
7. Мамонов К. А., Рудомаха А. В. Особливості територіального розвитку використання земель регіонів. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2019. Вип. 149. С. 113–118.
8. Пономаренко В. С., Тридід О. М., Кизим М. О. Стратегія розвитку підприємства в умовах кризи. Харків: ВД «ІНЖЕК», 2003. 328 с.
9. Економіко-математичні моделі економічного зростання / О. О. Бакаєв, В. І. Гриценко, Л. І. Бажан та ін. Київ: Наук. думка, 2005. 189 с.
10. Кулаковський Ю. П. Стратегія управління земельними ресурсами міста в умовах ринку (на прикладі м. Києва). *Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування*. 2004. Вип. 2 (26). Ч. 2. С. 526–531.
11. Ступень Г., Гулько Р., Микула О. Теоретичні основи державного земельного кадастру: навч. посіб. Львів: Новий Світ, 2006. 336 с.
12. Шпик Н. Р. Особливості організації використання земель міст. *Вісник ЛДАУ. Серія: Землевпорядкування і земельний кадастр*. 1999. № 3. С. 224–227.
13. Бухальська Т. В. Земельне адміністрування у межах населених пунктів. *Вісник НУВГП. Технічні науки*. 2014. Вип. 3(67). С. 24–32.
14. Шипулін В. Д. Система земельного адміністрування: основи сучасної теорії: навч. посіб. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. 220 с.
15. Мамонов К. А., Лю Чан, Канівець О. М. Розробка методу інтегральної оцінки використання земель об'єднаних територіальних громад. *Комунальне господарство міст. Серія: Інженерні науки і архітектура*. 2022. Т. 4. Вип. 171. С. 87–91.
16. Mamonov K., Velychko V., Holovachov V., Kovalenko L. Theoretical and methodological provisions regarding the development and implementation of an integral method for assessing the

level of information support of the multipurpose real estate cadastre at the regional level. *Ukrainian Metrological Journal*. 2023. № 2. P. 40–51.

17. Петраковська О. С., Беспалько Н. Р. Огляд методів прогнозування використання земельних ресурсів. *III International Scientific and Practical Conference «Land & property development: innovations and transformations»*. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7bdd3518-c7e7-410d-bc42-a307243b6285/content>.

18. Третяк А. М. Стан та проблеми методичного забезпечення оцінки земель сільськогосподарського призначення в Україні. *Збалансоване природокористування*. 2016. № 2. С. 113–118.

19. Drake P. R. Using the Analytic Hierarchy Process in Engineering Education. *International Journal of Engineering Education*. 1998. Vol. 14. № 3. P. 191–196.

20. Saaty Thomas L. Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications, 1999. 323 p.

21. Saaty T. L. Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A, Matemáticas*. № 102(2). P. 251–318.

22. Мамонов К. А., Метешкін К. О., Нестеренко С. Г., Мироненко М. Л. Нормативно-правове забезпечення територіального розвитку використання земель регіону. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2019. Вип. 147. С. 181–188.

23. Mamonov K., Liu Chang. A Geographic information system for territorial development of the marine regions of China. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2020. № 1 (13). P. 69–74.

24. Mamonov K., Kanivets O., Viatkin K., Voronkov O. The main conceptual provisions of the territorial development of the regional land use. *Geodesy and Cartography*. 2021. Vol. 70. № 2. P. 1–12.

Мамонов Костянтин Анатолійович, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-0797-2609. Тел.: +38(099)291-73-54. E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com.

Гой Василь Васильович, кандидат економічних наук, докторант кафедри економіки та маркетингу, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

ORCID iD: 0000-0003-1822-4478. Тел.: +38(099)033-30-22. E-mail: vasssgoi@gmail.com.

В'яткін Роман Сергійович, кандидат технічних наук, асистент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

ORCID iD: 0000-0001-8807-9988. Тел.: +38(095)003-44-39. E-mail: viatkinr@gmail.com.

Ковальчук Василь Степанович, аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0009-0007-1394-7008. Тел.: +38(050)130-64-30. E-mail: vasyk.kov.sumy@gmail.com.

Mamonov Kostiantyn, Dr. Sc. (Econ.), Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-0797-2609. Tel.: +38(099)291-73-54. E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com.

Goi Vasyk, PhD (Econ.), Doctoral Candidate at the Department of Economics and Marketing, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-1822-4478. Tel.: +38(099)033-30-22. E-mail: vasssgoi@gmail.com.

Vyatkin Roman, PhD (Tech), assistant of the Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-8807-9988. Tel.: +38(095)003-44-39. E-mail: viatkinr@gmail.com.

Kovalchuk Vasyk, postgraduate student of the department of Land Administration and Geographic Information Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0009-0007-1394-7008. Tel.: +38(050)130-64-30. E-mail: vasyk.kov.sumy@gmail.com.

Статтю прийнято 12.12.2024 р.

УДК 528.4:332.3

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ
У ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАДАХ**

Д-р філософії О. М. Канівець, канд. біол. наук Ю. Л. Скляр

**ANALYSIS OF LAND USE ASSESSMENT METHODS IN TERRITORIAL
COMMUNITIES**

Ph. D in Geodesy and Land Management O. Kanivets,
PhD in Biological Sciences Y. Skliar

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320691>

***Анотація.** У статті охарактеризовано методи оцінювання рівня використання земель у територіальних громадах, їхню сутність, переваги та недоліки. Особливу увагу приділено показникам ефективності виробництва сільськогосподарської продукції, збереженню земельного потенціалу та оцінюванню вартісних характеристик земельних ділянок. Визначено, що інтегральний підхід для оцінювання, базований на балах бонітету та інших кількісних показниках, є найефективнішим для комплексного моніторингу землекористування в територіальних громадах. Упровадження таких методів дає змогу удосконалити процес управління.*

***Ключові слова:** аналіз, метод, моніторинг, територіальна громада, використання земель.*

***Abstract.** The article is dedicated to creating a comprehensive system for monitoring land use in territorial communities based on a quantitative framework developed through the application of specialized evaluation methods. The study examines the main groups of indicators used to analyze land use efficiency, including production efficiency, preservation of land potential, and the overall economic efficiency of agricultural land development.*

An important aspect of the research is the regulatory assessment of soils, which is carried out considering capitalized income, bonitet scores, and spatial characteristics of land plots. Special attention is paid to cost-based evaluation methods widely used in international practice. These methods account for various groups of factors, such as spatial, engineering-geological, economic, administrative, and institutional, which allow for determining the market value of land plots within communities.

The study outlines key evaluation approaches, including reproduction methods, replacement methods, wear-and-tear analysis, and income-based methods, which involve direct and indirect capitalization, cash flow forecasting, and determination of residual value. Combined methods that integrate cost and comparative approaches, as well as methods for analyzing the most effective land use, are also considered.

A significant part of the work is devoted to a SWOT analysis of methods for assessing the state of land use in territorial communities. The authors examine the strengths and weaknesses of combined, integral, functional, and cost-based approaches. It is established that these methods enable the assessment of land use efficiency, considering economic, ecological, and functional characteristics. However, their application is limited by insufficient levels of information support and the low qualification of personnel in the communities.

The article concludes by emphasizing the need to implement modern monitoring tools, such as geoinformation systems, and to enhance the professional training of specialists in land resource management. The work represents an important step in forming a quantitative basis for land use monitoring and may be useful for local government authorities, experts, and researchers working in the field of land management.

Keywords: *analysis, method, monitoring, territorial community, land use.*

Вступ. В умовах децентралізації та реформування адміністративно-територіального устрою України особливо актуальним стає питання раціонального та ефективного використання земельних ресурсів територіальних громад. Земля є одним із ключових ресурсів, від раціонального використання якого залежить не лише економічна стабільність громади, але й екологічний стан території, соціальне благополуччя населення і сталий розвиток регіонів. Оцінка використання земельних ресурсів стає важливим інструментом для запровадження прогресивних рішень з організації території, оптимального розподілу земель, планування розвитку інфраструктури та запобігання деградації ґрунтів.

З урахуванням зазначених викликів, важливо досліджувати та аналізувати сучасні методи оцінювання використання земель, зокрема геоінформаційні системи (ГІС), що дають змогу проводити комплексний моніторинг стану земель. Впровадження ефективних методик оцінювання сприяє підвищенню якості управлінських рішень у територіальних громадах, забезпечуючи стале використання ресурсів для економічного зростання та охорони навколишнього середовища.

Аналіз публікацій та досліджень. Аналізуючи підходи для оцінювання, слід звернути увагу на роботи [1-3], де акцент зроблено на аспекти екологічної сталості територій і впливу земельних угідь на суміжні території, а також проаналізовано коефіцієнти людського впливу. Інтегральні методи оцінювання ступеня використання земель подано в дослідженні [4], у якому проаналізовано інтегральний показник, побудований на основі бонітетних балів.

Такий підхід застосовано і в роботах [5, 6]. Функціональні аспекти використання земель розглянуто в дослідженнях [7-9], вартісні характеристики земель – у роботі [10].

Мета дослідження. Визначення сучасних методів оцінювання стану використання земель територіальних громад, які формують кількісну основу моніторингу. Для цього необхідно узагальнити методи оцінювання стану використання земель громадами, розглянути їхні переваги та недоліки.

Основна частина. З метою створення моніторингу використання земель у територіальних громадах, як цілісної системи, сформовано кількісну базу, засновану на використанні спеціальних методик. Дослідження сучасних підходів свідчить про застосування таких груп показників для оцінювання ефективності використання земель:

- ефективність виготовлення продукції, визначена такими параметрами, як урожайність, вартість відносно одиниці площі, собівартість продукції, прибутковість з одного гектара, рентабельність, вміст кормових одиниць і затрати ресурсів на виготовлення комбікормів;

- збереження земельного потенціалу, що характеризується ефективністю інвестицій у покращення угідь, змінами гумусного балансу, інтенсивністю використання земель, коефіцієнтами екологічної стабільності, впливом угідь на суміжні території;

- загальногосподарська ефективність освоєння сільськогосподарських земель, що охоплює екологічні, технічні, структурні, соціальні й економічні аспекти [11].

Пропоновано проводити нормативну оцінку ґрунтів за такими показниками: нормативи капіталізованого доходу відповідного виду сільськогосподарських угідь у природно-сільськогосподарському районі Криму, області, Києва або Севастополя, грн/га; бал бонітету агропромислової групи ґрунтів для відповідного сільськогосподарського угіддя в межах природного району; усереднений показник бонітету ґрунтів відповідного типу сільськогосподарських земель у межах сільськогосподарського району (область, Київ чи Севастополь) [10].

Для конкретної земельної ділянки враховують такі параметри: площа сільськогосподарських груп земель у межах відповідних угідь (га); площа несільськогосподарських територій, таких як землі під дорогами, лісосмугами, господарськими будівлями чи тимчасовою консервацією (га); нормативи капіталізованого доходу для промислових (забудованих) земель у межах територій сільськогосподарського призначення (грн/га) [10].

Вартісний метод оцінювання використання земель описано в роботі [10], де нормативну грошову вартість квадратного метра земель формують із урахуванням суми витрат на упорядкування ділянки відносно квадратного метра (грн); норми прибутку; норми капіталізації; коефіцієнта, що відображує функціональне призначення земельної ділянки (наприклад під будівництво, для транспорту чи промисловості); показника, що враховує місце розташування ділянки [10].

Метод також враховує просторові характеристики земельної ділянки: чисельність населення, юридичний статус населеного пункту, його роль у системі розселення; розташування в межах приміських зон великих міст; знаходження в населених пунктах із курортним статусом; відстань до центральної частини населеного пункту, місць роботи чи зон відпочинку; локальні фактори розташування,

включаючи територіально-планувальні, інженерно-геологічні, історико-культурні, природно-ландшафтні, санітарно-гігієнічні умови та рівень облаштування території [10].

Вартісний метод широко використовують у міжнародному праві для оцінювання рівня використання земель [12-14]. Вартість земельних ділянок у межах територій визначають впливом кількох груп факторів:

- просторових, зокрема площа ділянки, її місце розташування, положення в структурі населеного пункту та довжина фасадної лінії.

- інженерно-геологічних, що впливають на придатність землі для забудови.

- економічних, таких як прибутковість ділянки та обсяг інвестицій у територію;

- адміністративних та інституційних;

- нормативно-правового регулювання.

Експерти зазначають, що вартість земельної ділянки визначають її цільовим призначенням і специфікою використання [15, 16]. На ефективність використання земель впливають також підходи для оцінювання нерухомості [17].

Вартісні методи оцінювання, які впливають на рівень використання земель:

1. Метод відтворення (витратний підхід) – застосовують для об'єктів, які неможливо замінити, або коли поточне використання об'єкта відповідає його найефективнішому застосуванню; метод заміщення – використовують для оцінювання вартості створення нового об'єкта відповідно до проєкту чи коли недоцільно відновлювати такий об'єкт у первісному вигляді. Вартість заміщення земельних поліпшень визначають за поточними витратами, урахувавши проєктно-кошторисну документацію, або одиничними показниками (площа, об'єм) [17].

2. Підхід визначення зносу поліпшень земель за показником розбиття, що дає змогу окремо оцінити кожен вид зносу об'єкта. Фізичний знос визначають за

окремими конструктивними елементами чи загальним технічним станом земельних поліпшень на дату оцінювання. Можливий розрахунок суми коштів на усунення чи заміну ознак зносу. Функціональний знос оцінюють за невідповідністю об'єкта сучасним вимогам або ринковим споживчим характеристикам (наприклад відсутність необхідних якостей чи наявність надмірних) [17].

Функціональний знос визначають із розрахуванням витрат, необхідних для усунення, створення або заміни ознак зносу. Економічний знос визначають порівнянням прогнозованих надходжень від найефективнішого використання схожих активів на оцінну дату з очікуваним доходом від самого об'єкта з урахуванням внеску земельних поліпшень.

Коефіцієнт придатності (або зносу) розраховують як добуток коефіцієнтів зносу, зокрема фізичного, функціонального та економічного, характерних для об'єкта оцінювання [17].

Метод строку життя спирається на припущення про залишковий строк використання об'єкта. За цього методу вважають, що всі види зносу оцінювання придатності об'єкта 100 % враховані [17].

Інші методи також можуть бути використані для визначення різних видів зносу за умови, що для кожного з них надано окреме обґрунтування та розрахунки, зазначені у звіті про оцінку майна [17].

Для дохідного підходу використовують такі методи:

1. Прямої капіталізації: валовий дохід базований на аналізі даних про оренду аналогічного нерухомого майна (розмір орендної плати, умови оренди) або інформації про його використання. Оцінюють операційні витрати і розраховують чистий операційний дохід (рентний дохід) за 365 днів від дати оцінювання з урахуванням стандартів [17].

2. Непрямої капіталізації (зниження грошового потоку): визначають період прогнозування; прогнозують валовий дохід,

операційні витрати і чистий операційний дохід (рентний дохід) за прогнозний період (за роками, кварталами або місяцями) відповідно до стандартів; вибирають ставку дисконту, обґрунтовують її вибір і розраховують; визначають поточну вартість грошових потоків як розмір поточної вартості рентного доходу; прогнозують реверсійну вартість (вартість на момент завершення прогнозного періоду) і розраховують її поточну вартість; підсумкову вартість об'єкта виражають як суму оцінної вартості грошового потоку та реверсійної вартості [17].

3. Методи із застосуванням ставок капіталізації та дисконту: порівнюють прогнозований операційний дохід за рік із ціною продажу чи пропозиції аналогічного майна; аналізують альтернативні варіанти інвестування та ризику, пов'язані з об'єктом оцінювання порівняно з безризиковими інвестиціями чи іншими ризикованими активами; застосовують процедури, які враховують дохід на вкладений капітал і його повернення, з обґрунтуванням у звіті про оцінку.

4. Метод визначення реверсійної вартості: для об'єктів із необмеженим строком використання ринкову вартість оцінюють на період, який починається після прогнозного; для об'єктів із визначеним строком використання на кінець прогнозного періоду розраховують суму ліквідаційної вартості земельних поліпшень і ринкової ціни земельної ділянки чи юридичних прав, пов'язаних із нею.

За дохідного підходу використовують такі методи:

1. Прямої капіталізації: загальний дохід прогнозують на основі аналізу даних про оренду схожих об'єктів нерухомості, включаючи суму орендної плати і умови оренди, чи відомостей про їх використання. Оцінюють операційні витрати і розраховують чистий операційний дохід (рентний дохід) на період одного року від дати оцінювання з дотриманням вимог п. 12 і 17 Стандарту [17].

2. Непрямої капіталізації (дисконтування потоків): виділяють період прогнозування; прогнозують валовий дохід, операційні витрати і чистий операційний дохід (рентний дохід) на основі аналізу років, кварталів чи місяців протягом прогнозного періоду згідно з п. 12, 13 і 17 Стандарту; обґрунтовують процедуру знаходження показника дисконту з розрахуванням; визначають вартість грошового потоку як добуток поточних вартостей рентного доходу; прогнозують реверсійну вартість (величину об'єкта на момент завершення прогнозного періоду) і її поточну вартість; вартість об'єкта визначають як суму оперативної вартості грошового потоку та поворотної вартості.

3. Методи із застосуванням ставок капіталізації та дисконту: порівнюють прогнозовані річні чисті операційні доходи (рентний дохід) із цінами продажу чи пропозиції аналогічного майна; оцінюють альтернативні інвестиції та ризики вкладення в оцінюваний об'єкт порівняно з безризиковими інвестиціями чи іншими можливими ризиками, пов'язаними з об'єктом; застосовують інші процедури оцінювання, що враховують дохід від вкладеного капіталу та його повернення, із зазначенням у звіті.

4. Метод визначення реверсійної вартості: для об'єктів із необмеженим строком використання прогнозують їхню ринкову вартість на початок періоду, що слідує за прогнозом; для об'єктів із вичерпним строком використання на кінець прогнозного періоду розраховують суму ліквідаційної вартості земельних поліпшень і справедливої ціни земельної ділянки чи прав на неї.

У рамках порівняльного підходу застосовують метод узгодження вартостей об'єктів порівняння за найбільш поширеними величинами вартостей об'єктів порівняння; на основі розрахунку середньозваженої вартості; за вартістю об'єкта, який зазнав найменших корегувань; із використанням інформації про об'єкти з

найбільш достовірними цінами продажу або пропонування; за допомогою інших процедур, обґрунтованих у звіті про оцінку майна [17].

У рамках оцінювання окремих видів майна використовують метод аналізу найефективнішого використання земель, що включає такі ситуації:

1. Оперативна (ринкова) вартість ділянки:

- може бути оцінена як для ділянки без поліпшень, так і умовно звільненої від них;

- якщо найефективнішим використанням ділянки є ліквідація поліпшень, ураховують витрати, необхідні для відновлення ділянки, але не враховують витрати на ліквідацію.

2. Особливості оцінювання:

- у разі, якщо в результаті розрахунку визначена від'ємна величина, то ринкову вартість приймають розміром одна гривня;

- якщо витрати на ліквідацію поліпшень перевищують вартість ділянки з цими поліпшеннями, то вартість поліпшень відповідає вартості ліквідації, і ділянку оцінюють як умовно вільну від поліпшень [17].

Метод аналізу інформації про орендну плату і ціни продажу схожих земельних ділянок використовують для оцінювання за дохідним і/або порівняльним підходами: оцінюють на основі даних про ціну оренди і вартість продажу або пропозиції подібних ділянок, за потреби враховують витрати на поліпшення землі в межах ділянки відповідно до п. 6 Стандарту, а якщо визначають ринкову вартість для найефективнішого використання, територію оцінюють вільною від покращень; якщо оцінюють ділянку в її поточному використанні, її також характеризують умовно вільною від покращень; за відсутності відомостей про вартість продажу, пропонування або розміри оренди подібних ділянок оцінка базована на припущенні про зміну цільового призначення ділянки з метою збільшення ефективності її використання, що забезпечує дохід [17].

Методика оцінювання враховує динаміку урожайності сільськогосподарських культур залежно від родючості ґрунтів на конкретній ділянці та рівня урожайності в межах агрогруп ґрунтів. Сукупний дохід, що використовуватиметься для розрахунку рентного доходу, визначають із урахуванням типового урожаю і ринкових цін на сільськогосподарську продукцію.

До витрат, урахуваних для розрахунку рентного доходу, належать загальновиробничі витрати і прибуток виробника для певного регіону. У разі оцінювання земель із лісовою рослинністю рентний дохід обчислюють як різницю між прогнозованим валовим доходом за використання лісових ресурсів і витратами на виробництво й типового прибутку за період вирубки [17].

Комбінований метод включає витратний і порівняльний підходи, а також їх поєднання. У такому випадку вартість об'єкта незавершеного будівництва розраховують як різницю між прогнозованою ринковою ціною готового об'єкта і дисконтованими витратами на

завершення будівництва і введення в експлуатацію [17].

Метод аналізу корисності базований на оцінюванні природних об'єктів за їхньою цінністю для власника чи користувача з урахуванням обмежень, встановлених законодавством [17].

Документальний метод використовують для оцінювання земель державної чи комунальної власності, а також викупу приватних земель у зв'язку з суспільною необхідністю. Звіт про оцінку доповнюють низкою документів, зокрема витягами із затверджених переліків земельних ділянок, рішеннями органів влади, технічними паспортами, планами ділянок і виписками з земельних документів [17].

Для оцінювання стану використання земель територіальними громадами використовують експертні методи оцінювання, що надають кількісну базу для моніторингу та є особливо корисними, коли неможливо отримати точні дані за абсолютними показниками.

У таблиці проведено SWOT-аналіз методів оцінювання використання земель територіальними громадами.

Таблиця

Узагальнення методів оцінювання стану використання земель територіальними громадами

Методи	Сутність	Сильні сторони	Слабкі сторони
1	2	3	4
Комбіновані	формування комплексних показників, зосереджених на визначенні ефективності використання ділянок, нерухомості, потенціалу земель, екологічної стабільності та екологічного впливу діяльності на прилеглі території	дають змогу оцінити стан використання земель громадами з урахуванням результатуючих та екологічних характеристик	неврахування інших ключових характеристик, що формують використання земель громадами, зокрема містобудівних, інвестиційних та ін.

Продовження таблиці

1	2	3	4
Інтегральні	визначення інтегральних аспектів використання земель громадами	дають змогу оцінити стан землекористування з урахуванням широкого спектра інвестиційних просторових і містобудівних факторів	складність формування та виокремлення факторів, що формують параметри використання територій, недосконалий рівень інформаційного забезпечення, використовувані з метою знаходження критеріїв використання земель громадами
Функціональні	визначення стану використання земель громадами з урахуванням їхніх функціональних характеристик	дають змогу визначити стан землекористування ділянок громадами на базі функціональних спрямувань, що формує умови і можливості для вжиття заходів у землекористувацькій сфері	нівелювання інших показників використання і параметрів стану земель громад
Вартісні	визначення вартісних показників землекористування громадами	дають змогу оцінити вартісні характеристики використання земель, сприяють формуванню заходів для покращення їхньої інвестиційної привабливості	зменшення потенціалу формування інформаційно-аналітичного забезпечення з визначення оцінних показників стану користування землями

Висновки. Під час дослідження визначено методи оцінювання ступеня використання земель громадами, що забезпечують формування кількісної бази для моніторингу. Ці методи враховують широкий спектр факторів, пов'язаних із просторовими, містобудівними, соціально-економічними та екологічними умовами. Але однією з основних проблем у застосуванні методів оцінювання використання земель є недостатній рівень інформаційно-аналітичного забезпечення на

рівні територіальних громад. Багато громад не мають доступу до сучасних інструментів моніторингу та аналізу, таких як геоінформаційні системи, що обмежує можливості для точного обліку земельних ресурсів. Крім того, важливим викликом є низька поінформованість і недостатня кваліфікація кадрів у сфері управління земельними ресурсами, що залишається подальшим напрямом майбутніх досліджень.

Список використаних джерел

1. Величко В. А. Екологія родючості ґрунтів. Київ : Аграрна наука, 2010. 274 с.
2. Коренюк П. І. Менеджмент навколишнього природного середовища: монографія. Дніпропетровськ: НГАУ, 2001. 222 с.

3. Ніколаєнко Т. С. Соціо-еколого-економічна ефективність землекористування в Україні: просторовий аспект / за ред. Б. М. Данилишина. Київ: РВПС України НАН України, 2007. 72 с.
4. Моніторинг довкілля: підручник / В. М. Боголюбов, М. О. Клименко, В. Б. Мокін та ін. Вінниця: ВНТУ, 2010. 232 с.
5. Боярко І. М., Гриценко Л. Л. Інвестиційний аналіз: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2011. 400 с.
6. Булишева Д. В. Еколого-економічні аспекти вдосконалення містобудівної політики. *Вісник ОНУ імені І. І. Мечникова*. 2014. Т. 19. Вип. 2/5. С. 13–16.
7. Дадашев Б. А. Теоретичні і методичні основи визначення економічної ефективності сільського господарства. Суми: Мрія – 1 ЛТД, УАБС, 2003. 32 с.
8. Групове експертне оцінювання та компетентність експертів / О. М. Величко, Л. В. Коломієць, Т. Б. Гордієнко та ін.; за заг. ред. О. М. Величка. Одеса: ФОП Бондаренко М.О., 2015. 286 с.
9. Крисанов Д. Ф. Економіко-екологічні проблеми харчової промисловості України: монографія. Київ: Інститут економіки НАН України, 2002. 259 с.
10. Про Методику нормативної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення та населених пунктів: Постанова Кабінету Міністрів України від 23.03.1995 р. № 213. URL: <http://zakon.rada.gov.ua>.
11. Коренюк П., Чмуленко М. Методика оцінки ефективності використання та відтворення продуктивних угідь сільськогосподарських підприємств. *Економіка природокористування. Економіст*. Січень 2012. № 1. С. 47–50. URL: <https://www.google.com/url?sa=t&rcet>.
12. Особливості оподаткування об'єктів нерухомого майна. URL: <https://news.dtki.ua/taxation/other/38717-osoblivosti-opodatkuвання-objektiv-nerухомого-maina>.
13. Грущинська Н. Характеристика нерухомого майна як об'єкта цивільного права. *Підприємство, господарство і право*. 2020. № 2. С. 23–30.
14. Li B. Forest Landscape Restoration in the Nether lands. Reference Document. Wageningen Centre of Development Innovation, Wageningen University, 2010. 81 p. URL: <http://www.forestlandscaperestoration.org>.
15. Горланчук В. В., В'юн В. Г., Песчанська І. М. Управління земельними ресурсами: підручник. Львів: Видавництво «Магнолія Плюс», 2006. 443 с.
16. Грабовецький Б. Є. Основи економічного прогнозування: навч. посіб. Вінниця: ВФ ТАНГ, 2000. 209 с.
17. Національний стандарт № 2 «Оцінка нерухомого майна»: Постанова Кабінету Міністрів України від 28 жовтня 2004 р. № 1442. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1442-2004-п>.

Канівець Олена Миколаївна, доктор філософії з геодезії та землеустрою, доцент кафедри геодезії та землеустрою, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0002-9597-6617. Тел.: +38(099)041-82-95. E-mail: leva1205@ukr.net.

Скляр Юрій Леонідович, кандидат біологічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0002-5790-1331. Тел.: +38(095)303-32-50. E-mail: sul_bio@ukr.net.

Olena Kanivets, Ph.D in Geodesy and Land Management, Associate Professor, of the Department of Geodesy and Land Management, Sumy National Agrarian University. ORCID iD: 0000-0002-9597-6617. Tel.: +38(099)041-82-95. E-mail: leva1205@ukr.net.

Yurii Skliar, Ph D in Biology, Associate Professor, of the Department of Geodesy and Land Management, Sumy National Agrarian University. ORCID iD: 0000-0002-5790-1331. Tel.: +38(095)303-32-50. E-mail: sul_bio@ukr.net.

Статтю прийнято 11.12.2024 р.

УДК 336.221.4: 061.1

АКТУАЛІТЕТИ ЗЕМЕЛЬНОГО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ОБОРОННОЇ СТІЙКОСТІ УКРАЇНИ

Д-р екон. наук Г. І. Шарій, д-р техн. наук Є. Б. Угненко,
асист. Н. І. Сорочук, кандидати техн. наук Є. М. Коростельов, О. М. Ужвієва

CURRENT ISSUES OF LAND DEVELOPMENT IN COMMUNITIES AND DEFENSIVE RESILIENCE OF UKRAINE

Dr. Sc. (Econ.) G. Shariy, Dr. Sc. (Tech.) Ye. Ugnenko, Assistant N. Sorochuk,
PhD (Tech.) Ye. Korostelov, PhD (Tech.) O. Uzhviieva

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320700>

***Анотація.** У роботі розглянуто актуальні питання та проблеми земельних відносин в Україні, визначено пріоритети землеустрою та земельного розвитку на період війни. Визначено посилення соціальної справедливості в перерозподілі земель, припиненні безоплатної приватизації, обмеження скуповування земель в одні руки, недопущення аукціонного перерозподілу природних кормових угідь і громадських пасовищ і городів, формування справедливого перерозподілу земельної ренти. Зазначено про необхідність подальшого вдосконалення адміністративно-територіального устрою, Генеральної схеми України, державних будівельних норм, політики рурбанізації. Розглянуто необхідність розширення земель оборони та особливий землеустрій прикордонної смуги і стокілометрової прикордонної зони. Визначено, що ревіталізація земель сільськогосподарських, лісового і водного фонду забудованих територій в умовах великих площ бєлігеративних ландшафтів, сформованих війною, потребує зусиль і допомоги світового співтовариства та кардинальної зміни регуляторної політики у сфері землеустрою і земельного кадастру.*

***Ключові слова:** земельні відносини, земельний розвиток, соціальна справедливість, бєлігеративний ландшафт, ревіталізація, рурбанізація землі оборони, землеустрій.*

***Abstract.** The paper addresses the pressing issues and challenges of land relations in Ukraine, emphasizing the urgent need to redefine priorities for land management and development during the wartime period. It highlights that the ongoing war and military aggression in Ukraine have intensified the necessity for improving land relations, revising land policies, and incorporating best practices and expertise from European and global countries. However, it stresses the importance of adapting these strategies to Ukraine's unique conditions and cautions against excessive liberalization, which could lead to negative consequences.*

Special attention is given to fostering social justice in the redistribution of land. This includes ending the practice of free privatization, placing stricter limits on the concentration of land ownership by a single entity, and preventing the auction-based redistribution of natural grazing lands, community pastures, and gardens. The document also underscores the importance of ensuring an equitable allocation of land rent to benefit local communities and stakeholders.

In terms of spatial development, the paper points to the critical need for enhancing administrative-territorial structures, revising the General Plan of Ukraine, updating state construction norms, and promoting balanced rurbanization policies to achieve sustainable development.

Additionally, the text explores the necessity of expanding defense lands and implementing specialized land management systems within the border strip and the 100-kilometer border zone, reflecting the current geopolitical challenges.

Finally, it concludes that revitalizing agricultural, forest, and water fund lands, especially in regions affected by the war, will require substantial efforts, comprehensive international support, and significant regulatory reforms in land management and cadastral policies to ensure sustainable recovery and development.

Keywords: Land relations, land development, social justice, war-affected landscape, revitalization, rurbanization of defense land, land management.

Вступ. В умовах війни землевпорядники, як й інші фахівці, повинні мобілізуватися для допомоги державі та провести моніторинг земель для розбудови і підвищення стійкості та обороноздатності країни у відповідь на агресивні геополітичні виклики.

В Україні війна та агресія змушують постійно вдосконалювати земельні відносини, змінювати ставлення до землі і суспільні актуалітети земельного розвитку [1].

Історичний досвід країн Європи і світу необхідно запозичувати, але, враховуючи умови України, використовувати розумно та імплементувати, трансформуючи до її умов [2].

В умовах війни стає наочно зрозуміло, що земля істинно просторовий політичний базис нашої країни. На землю посягали і посягають сусіди, тому забезпечення стійкості, військова та національна безпека – нині найвищий пріоритет земельного розвитку нашої країни.

Указаному суспільному пріоритету необхідно приділити найбільшу увагу, підпорядковуючи суспільні і державні інститути: адміністративно-територіальну реформу; генеральну схему; систему розселення; розміщення земель оборони; організацію і землеустрій смуги прикордонних територій; розвиток окремих категорій земель; Генеральну схему України; стратегії розвитку громад, районів, областей, агломерацій; екологічний, економічний, містобудівний та інфраструктурний каркас України; земельний кадастр, землеустрій,

оцінювання й обіг земель, геоматику і рентні платежі [3].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення пріоритетів землеустрою і земельного розвитку України на період війни.

Стратегії земельного розвитку громад. Термін «бойкот» пішов від прізвиська недбалого управляючого – англійця, який намагався нав'язати 140 років тому ірландцям несправедливу орендну плату і високі земельні платежі, оскільки Англія відібрала в них право власності на історичні землі. З того часу Земельні ліги дотримуються соціальної справедливості в земельних відносинах за принципом «Три F»: вільний обіг земель; фіксоване володіння, захищене державою і правом; справедлива орендна плата [2].

Соціальна справедливість має пронизувати земельні відносини і за вертикаллю, і за горизонталлю, стаючи фундаментом земельного розвитку.

Соціальна справедливість, як особлива суспільна вимога в умовах війни, потребує націоналізації земель колаборантів, ухиянтів, громадян і юридичних осіб країни-агресора.

Соціальна справедливість в умовах припинення безоплатної приватизації зобов'язує концептувати і використовувати державні та комунальні землі на користь насамперед не приватних, а суспільних інтересів оборони.

Адміністративно-територіальна реформа сформувала в Полтавській області 60 громад. Реформа пройшла добровільно,

але не так гладко, як потрібно. На нашу думку, проведення реформ за принципом добровільності виявило ряд суттєвих недоліків і проблем. У результаті в області сформовано третину непропорційних і нераціональних у просторовому плані громад, половина громад не мають ні демографічних, ні соціально-економічних перспектив.

Десять громад Полтавщини мають у складі більше 50 населених пунктів, а 10 громад мають менше 6 тис. населення. Більшість громад демографічно депресивні, коли народжуваність відстає від смертності більш ніж у шість-вісім разів [4].

Проблемними залишаються просторова конфігурація громад, величезна різниця в площах. Частина громад мають недостатню економічну спроможність, а центри громад не є центрами економічного тяжіння для сусідніх поселень. Частина громад не надають повноцінно соціально-адміністративних послуг, особливо якісних медичних та освітніх. Рациональність і спроможність громад не підкріплена транспортним сполученням, транспортною інфраструктурою, подекуди дорожнє покриття автомагістралей і доріг повністю вийшло з ладу.

Частина громад тяжіють до інших областей і на часі переформатувати обласний і районний устрій, можливо, з ліквідацією районів та областей у систему «край – громада».

Але це потребує конституційних змін і набагато вищого професіоналізму в керівництва областей, районів і громад.

Генеральна схема України, прийнята ще на початку 2000-х років, потребує негайного повторного розроблення з урахуванням агресії, Євроінтеграції та реальної системи розселення і наявних поселенських агломерацій. Відсутність актуальної Генеральної схеми ускладнює питання планування і розвитку транспортної інфраструктури, стратегії розвитку громад, формування екологічного каркаса та інших питань, пов'язаних із

розвитком як центральної України, так і прикордонних територій [1, 4].

Системи інфраструктури також суттєво застарілі і потребують сучасного планування і землеустрою території, аж до громади і окремих землеволодінь, за допомогою економіко-математичних оптимізаційних моделей на основі бонітування, економічного оцінювання земель, вирішення транспортних завдань з урахуванням містобудівних та інфраструктурних потреб, економічної, енергетичної безпеки та євроінтеграції, військових потреб і національної безпеки та оборони.

Особливо важливими є питання Схеми санітарного очищення територій областей і громад, які практично відсутні, а тисячі звалищ самовільно наповнюються і не відповідають нормативним вимогам.

Війна потребує більш стійких до ризиків лібералізованих містобудівних державних будівельних норм, зонування території, підземного захищеного розміщення військових об'єктів, логістики, наливних складів і терміналів, об'єктів енергетики, особливо в зоні можливого ураження.

Система розселення в Україні – унікальне явище. Навіть якщо в найбільш економічно самодостатній громаді Полтавської області – Опішнянській – із 33 населених пунктів в 11 населення за реєстрацією зараз відсутнє, то це вказує на соціально-економічну, демографічну і містобудівну кризу України, що має негативну оцінку внутрішньої економічної політики нашої держави як мінімум за останні 50 років. Посилює негатив і нині чинна методика нормативно-грошового оцінювання поселень, яка залежить від кількості жителів за реєстрацією [4].

Європа йде шляхом рурбанізації, тобто державної системи стимулювання переселення жителів міст на сільські території не тільки центрів міст (джентрифікація) і поглинання приміських сіл і поселень, а і розселення міських

агломерацій, шляхом стимулювання сільського будівництва, розосередження підприємств переробної, легкої та електротехнічної промисловості, розміщення центральних органів виконавчої влади в сільських поселеннях з перенесенням адміністративних центрів округів, регіонів, столиць [5].

Війна потребує переформування системи розселення, особливо на півночі, сході і півдні України, переселення, зселення, розбудови частини поселень, кластеризації території за прикладом ізраїльських кібуц. Військові бази і поселення потребують національно-безпекового рівня організації. Центри громад у районах бойових дій прикордонних територій необхідно перемістити вглиб країни і переформувати до умов війни, сформувавши військово-територіальні округи, що забезпечуватиме національну безпеку, високу стійкість проти агресії, самодостатність поселень, екологізацію території, комфортне проживання, високу освоєність земель і раціональне використання природних ресурсів і території країни.

У разі зникнення невеликих сіл унеможливлється повноцінне використання сільськогосподарських угідь, пасовищ і цінних містобудівних земель, земель рекреації та оздоровчого призначення, звужується етно-культурний, історико-традиційний потенціал територій [6].

Нині в Україні, особливо на півдні і сході, переважають белігеративні ландшафти, які руйнують локальні екосистеми, а впливи поліцеклічних сполук, канцерогенів і отруйних речовин формують забруднення континентального масштабу. Ревіталізація белігеративних ландшафтів, особливо в поєднанні з землями зруйнованих промислових зон і поселень, потребує зусиль не тільки України, а і світу.

Землі оборони нині мають особливу значущість і суспільну цінність, а держава повертає державні земельні ресурси і землі

для потреб оборони і військової інфраструктури, підпорядкувавши приватні і комунальні інтереси вищій суспільній цінності, – національній воєнній безпеці [7].

Землі оборони повертаються не тільки в старі межі, вони мають бути відведені в смузі, прилеглій до кордонів і ворога до 100 км вглиб, як славнозвісна «лінія Маннергейма» у Фінляндії. Потрібно одіозний інститут «приватного» кордону в Сумській, Харківській, Закарпатській областях законодавчо ліквідувати, а землі в прикордонній смузі, надані за корупційними схемами, націоналізувати.

Заслуговують на увагу землі військових радгоспів, лісгоспів і сотень інших стратегічних земельних об'єктів: полігонів, ділянок, придатних для летовищ, логістики, оборонних виробництв, ремонтної, обслуговуючої та рекреаційної, медично-госпітальної та оздоровчої баз.

Потрібна принципово нова прикордонна інженерна організація території до 100 км в глибину з побудовою оборонних лінійних об'єктів, включаючи водні, лісові та штучні вузли оборони, що потребує викупу, обміну та вилучення земель для потреб гострої суспільної необхідності та оборони.

Планування, організація, особливий землеустрій і землевпорядкування прикордонних смуг і територій потребують сучасних підходів, не типових для мирного часу і добросусідства.

Розглянемо детально актуалітети в розрізі окремих категорій земель.

Землі сільськогосподарського призначення мають особливу суспільну цінність, формують і бюджет України, і продовольчу безпеку і найбільше страждають у зоні бойових дій. Тут важливо раціонально капіталізувати земельні відносини, правильно оцінивши природну родючість і справедливо перерозподіливши рентні платежі між народом України, землевласником і користувачем [8].

Користувач, тим більше забруднювач, повинен платити, а виробник органічного

землеробства, навпаки, отримувати стимул і захист держави. Органічне землеробство, сівозміни, розумне та комбіноване землеробство стає державним пріоритетом, що збереже родючість і сталість господарювання і просуне нашу продукцію на ринки світу [6-8].

Тільки справедливе оцінювання земель і земельних поліпшень установить справедливий перерозподіл земельної ренти між громадою, державою, селянами та сільгоспвиробниками.

Ліси і лісосмуги громади повинні взяти під свій контроль, а держава лобювати і стимулювати громади до заліснення, передавши агроліси громадам і взагалі вивівши з тіні гіперцентралізованого і корумпованого ДП «Ліси України» ліси під громадський контроль і контроль уряду України.

Сільськогосподарські кооперативи, кластери, комунальні сільські підприємства та молочне тваринництво потребує нових підходів в організації сільськогосподарських земель, особливо з урахуванням і необхідністю відновлення, рекультивації, повторного освоєння та меліорації величезних територій, що постраждали від війни [8].

Особливо заслуговують на увагу орні меліоровані землі та методи технічної і біологічної рекультивації порушених війною земель на півдні України, де можливості самовідновлення едафотопу ґрунту обмежені.

Соціально-справедливий перерозподіл у минулому обцинних і громадських земель, захист інтересів сільської молоді і доступ молодих сімей, що бажають жити, працювати в сільській місцевості та займатися фермерством, до земельного ресурсу заслуговують на особливу підтримку держави і громад. Необхідно відмовитися від чисто ринкових теорій і аукціонних практик перерозподілу сільськогосподарських земель, адже вони працюють не на бюджет, а виключно на користь крупних латифундистів.

Селоутворююча функція сільгоспідприємств і фермерських і селянських господарств є головною в системі розселення і збереження сільських поселень. У Полтавській області з 1870 поселень у 930 відсутні господарські підрозділи, а в 400 навіть фермерські господарства. На сьогодні фермерське та селянське господарство сільського жителя в трудонедостатньому селі має бути під особливим контролем громад. Але без кооперації і кластеризації самозайнятість селян в особистих господарствах неефективна і нераціональна, особливо в умовах транспортно-інфраструктурних проблем і низької купівельної спроможності громадян.

Земельні аукціони в погоні за гривнею згубно діють на сільське тваринництво, забираючи в селян пасовища, і лишають села останніх перспектив, особливо на Київщині. Громади повинні мати можливість проводити земельні конкурси. Корупція постійно переміщується у центри прийняття земельних рішень, з сільських рад, у райдержадміністрації, потім у держгеокадастр, нині у громади.

За останні десять років в Полтавській області розорано 180 тис. га природніх угідь, а площа орних земель зросла до 1880 тис. га, і це тільки завдяки на перший погляд, прозорому і ринковому механізму, – аукціонам.

Тому, природні сінокоси і пасовища, ділянки огородинства необхідно вивести з перерозподілу на аукціонах.

Посів ранніх зернових на Полтавщині в 2024 році очікувано заганяє агросферу в глухий кут згубної дії на біосферу. В області планували посіяти з 1,4 млн га 630 тис. га технічних культур і більше 480 тис. га кукурудзи, тобто тиск пропашних культур на природну родючість переводить ґрунти в стан ґрунтовтоми і ґрунтотоксикозу, а тиск штучної родючості на користь економічної непомірний і невиправданий навіть за умов війни. Економічне «браконьєрство» ґрунтів – це екологічна агресія, що нищить ґрунти

України і робить жебраками майбутні покоління [9].

Низький відсоток заліснення, вилучення 70 тис. га агролісів до держави в Полтавській області, лісоневкриті площі, низька якість лісонасаджень, малі об'єми лісопосадок з боку держлісгоспів, самовільні вирубки, лісові пожежі потребують зміни акцентів і мобілізації громад до заліснення, охорони і збереження лісових ресурсів України. Гіперцентралізація поетапно ліквідувала якість діяльності Держгеокадастру, інститутів землеустрою та раціональність лісогосподарської галузі в державі та гіперзбагачує керівництво ДП «Ліси України» і корупційну вертикаль. Лісовий кадастр, подеревний облік, таксація, реєстри, лісоустрій, заліснення, особливо в умовах війни, потребує системних інновацій. Або держава врегулює ці питання, або указане державне підприємство разом із війною знищуватиме ліси України.

Тому громадам потрібно передати не тільки агроліси, а і під контроль передати лісовий фонд у подвійну охорону та відтворення, що дасть змогу довести залісненість земель до 16 % для лісостепу, а для лісосмуг – із 1,2 до 2,5 % у лісостеповій і до 5 % у степовій зоні. І це нагальне завдання суспільства.

Також потрібні зміни в політиці землі водного фонду, особливо сфері охорони вод, забезпечення питною водою і водовідведення. Якість поверхневих і підземних вод, особливо для потреб питної води, незадовільна. Потребують реконструкції, знесення та заміни сотні гідроспоруд. Особливий режим потрібний для меліорованих земель. Водоохоронні зони сформовано у Полтавській області тільки в Котелевській громаді. Річкам потрібне місце, заплава заплаві, а берег берегу. Досвід басейнових управлінь і водні директиви ЄС дали змогу повернутись у Європі лосося на нерест у річку Рейн, але дослідження виявили, що в Україні об'єми

забруднень поверхневих вод, ґрунтів і ґрунтових вод колосальні.

Величезною є водоемність нафтогазового комплексу, гірничих і вугільних добувних виробництв, металургії. Перекачуючи пластові води в поверхневі водотоки, ці виробництва перетворили річки і потічки в канали забруднених вод, які так само забруднюють підґрунтові води і болотні системи, ґрунти та водоносні підземні горизонти [10].

Землі рекреації, оздоровлення, історико-культурного і природоохоронного призначення мають унікальні шляхи розвитку, але повинні мати державні і регіональні програми розвитку, власні кадастрові реєстри з внесенням кожної ділянки і кожного цінного просторового об'єкта.

Землі промисловості актуальні завжди – це і промзони, і технопарки. Але величезна землеємність підприємств України потребує технологічних змін і норм відведення в осучасненому стані.

Просторова стратегія розвитку громад і областей на сьогодні формалізована і є лише на папері.

Стратегії розвитку громади – це насамперед відхід від формалізму, і ними громади повинні керуватися в роботі. Стратегії формують на основі аналізу і кластерної співпраці геодезистів, землевпорядників, кадастровиків, геологів, економістів, геоботаніків, архітекторів, екологів, лісомеліораторів, соціологів, демографів і виключно за участю вчених, які не зацікавлені в корупційних змаганнях і перевагах.

Внутрішні функції управління також важливі для державних служб, особливо у сфері геодезії та землеустрою. На сайті Держгеокадастру аналізуємо результати реєстрації ділянок сертифікованими інженерами-землевпорядниками: процес дещо призупинено, але заформалізованість перереєстрації нерухомості в селах призвела до тисяч пусток і просто покинутих садиб.

В Україні працює Рада з національної інфраструктури геопросторових даних, але зареєстрували за 2023 рік лише 97 тис. га земель. Якщо земель сільськогосподарського призначення зареєстровано 33 млн га, або 74 %, то проведено нормативне грошове оцінювання лише третини поселень.

Землеустрій нівельований у проблемі обігу сільськогосподарських земель, особливо в тіньовому форматі та економічному опортунізмі землекористувачів, який перевищує не тільки екологічні вимоги, а і цілісні суспільні інтереси, особливо економічні і бюджетоутворюючі.

За 2023 рік в Україні в електронну форму перетворено лише 1392 технічної документації з землеустрою.

В Україні за останній рік відчужено невелику кількість земель (до 1 %), а міфи про ринок земель і його політизація високі. Але як може брати участь у торгах селянин (фермер), який перебуває на війні? Держгеокадастр відійшов від управління землями в стратегічному плані, землеустрою зокрема, самоусунувшись також і від завдань охорони земель [11].

Завдання державної служби Держгеокадастру зведені до трьох блоків питань: національна інфраструктура геопросторових даних; адміністративні послуги; пропозиції з формування політики у сфері ДЗК, землеустрою, охорони і родючості ґрунтів, що перетворює державну службу на споглядача і статиста земельної реформи та земельного розвитку.

Архіви райземів, звезені з 1998 року з архівів сільських, селищних і міських рад, знаходяться в занедбаному стані, потребують оцифрування і передавання в громади. Держгеокадастр намагався сканувати технічну документацію централізовано, звозивши документацію в Київ, але, здійснивши з Полтавської області перевезення і повернувши змішані папери з інших областей, цей процес призупинили.

Архіви – це безцінна інформація і праця поколінь, їх необхідно оцифрувати і створити обласні та державні архіви і

реєстри технічної документації із землеустрою та кадастру.

Геоматика – термін, що прийшов до нас із Канади, поєднує геоінформатику, моделювання і управління даними, спираючись на геодезію і картографію, трансформує просторово прив'язані дані в інформаційні системи, де програмне забезпечення і штучний інтелект опрацьовують просторові моделі управління і розвитку [12].

У світі освітньо-наукові і суспільні інститути геодезії і землеустрою перейменовують в Інститути геоматики, але зберігають державні управлінські інститути, фонди державних земель або уповноважені державою структури на кшталт SAFAR (Франція).

Але геоматика не підміняє картографію, фотограмметрію, ДЗЗ, інформатику, геодезію, ГІС, глобальне позиціонування, цифровізацію зображень, а, об'єднуючи дисципліни, формує раціональну взаємодію для синергетичного фахового ефекту спроможності формування компетентності спеціалістів для державного регулювання земельного розвитку [13].

Тільки тісна взаємодія стейкхолдерів, зацікавлених у підготовці фахівців, виробничників і державних службовців, які допомагають освіті і науці, дасть змогу утримати високу якість фахівців, державну регуляторну і наукову складову земельного розвитку України.

Висновки. В умовах війни в Україні шлях удосконалення земельних відносин має передбачити посилення суспільних і державних інтересів і соціальної справедливості щодо використання земельних ресурсів.

Забезпечення стійкості земельних відносин і національну воєнну безпеку розглядають як вищий пріоритет земельного розвитку.

Необхідно активувати подальший розвиток адміністративно-територіального устрою, Генеральної схеми України, зонування території, особливий землеустрій

прикордонних громад і стокілометрової смуги біля кордонів.

Особливої актуальності набуває стійка система розселення, розміщення виробничого та оборонного потенціалу, урбаністика і рурбанізація.

Потребують унікальних землевпорядних рішень белігеративні

ландшафти, на яких екологічні і містобудівні виклики досягли небувалих рівнів [14].

У цілому земельні відносини в Україні потребують новітньої земельної політики, нової якості державного регулювання і раціональної діяльності землевпорядних служб і організацій.

Список використаних джерел

1. Шарий Г. І. Розвиток земельних відносин та поліпшення ефективності агровиробництва і стану земельних ресурсів. *Землевпорядний вісник*. 2020. №1. С. 24-29.
2. Ткачук А. Скандинавський шлях. Досвід реформ адміністративно-територіального устрою і місцевого самоврядування в Данії та Швеції. Київ: Лотос, 2015. 124 с.
3. Шарий Г. І. Краєвий устрій України. *Землевпорядний вісник*. Київ, 2015. № 2. С. 41-45.
4. Розвиток адміністративно-територіального устрою України як відповідь на мілітарні виклики / Г. І. Шарий, Є. Б. Угненко, Н. І. Сорочук та ін. *Збірник наукових праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2023. Вип. 206. С. 129-138.
5. Application of Laser Technologies for Scanning Communication Routes While Restoring the Infrastructure of Ukraine/ Sergii Panchenko, Yevgeniia Ugnenko, Elena Uzhviieva, Yevhen Korostelov, Nataliia Sorochuk. *International Conference TRANSBALTICA: Transportation Science and Technology, TRANSBALTICA2023: TRANSBALTICA XIV: Transportation Science and Technology, Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. 2024. P. 3–11.
6. Угненко Є. Б., Ужвієва О. М., Сорочук Н. І. Аналіз нормативної бази оцінки шкоди та збитків, завданих земельним ресурсам України внаслідок збройної агресії. *Матеріали XXVI Міжнародної науково-технічної конференції «Технологія-2023», Україна, м. Київ, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 26 травня 2023 року*. Київ, 2023. С.192-195.
7. Сорочук Н. І., Сорочук Ю. О. Визначення розміру шкоди, завданої земельним ресурсам України під час дії воєнного стану. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції «Сучасні тенденції економічного розвитку регіонів: теоретичні та прикладні аспекти» 09-10 травня 2024 року, Україна, м. Одеса*. Одеса: ОДАБА, 2024. С. 348-351.
8. Особливості раціонального використання земель сільськогосподарського призначення в умовах воєнного стану / Є. Б. Угненко, О. М. Ужвієва, Н. І. Сорочук, Ю. О. Сорочук. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології землеустрою, кадастру та управління земельними ресурсами», Україна, м. Київ, НАУ, 16–17 березня 2023 р.* Київ, 2023. С. 101-103.
9. Полтавська область – Громад. URL: decentralizion. gov. ua.
10. Сорочук Н. І., Сорочук Ю. О. Оцінка шкоди, завданої земельним ресурсам водного та природоохоронного фондів України в ході російської збройної агресії. *Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті, MINTT – 2024», 29–31 травня 2024 року, Україна, м. Одеса, Херсонська державна морська академія: тези доповідей конференції*. Одеса, 2024. С. 340-341.

11. Geoinformation systems design of repairs of connection roads on the basis of laser scanning / Ievgeniia Ugnenko; Elena Uzhviieva; Nataliia Sorochuk; Valentina Yurchenko; Gintas Viselga. *AIP Conference Proceedings* This link is disabled., *AIP Conf. Proc.* 2684, 020012 (2023).

12. Інженерно-геодезичні вишукування. Геометричне нівелювання траси / Є. Б. Угненко, Г. І. Шарий, О. М. Ужвієва та ін. *Збірник наукових праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2024. Вип. 208. С. 92-105.

13. Навчальна геодезична практика: навч. посіб. / Є. Б. Угненко, А. О. Шевченко, О. М. Ужвієва та ін. Вид. 2-ге. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2024. 228 с.

14. Сорочук Н. І., Зеленська А. А., Сорочук Ю. О. Екологічні проблеми в галузі використання та охорони земель під час воєнних дій. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологічно сталій розвиток урбосистем», Україна, м. Харків, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2-3 листопада 2022 року.* Харків, 2022. С. 90-92.

Шарий Григорій Іванович, доктор економічних наук, завідувач кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ORCID iD: 0000-0001-5098-2661. Тел.: +38(050)8504444. E-mail: shariy.grigoriy61@gmail.com.

Угненко Євгенія Борисівна, доктор технічних наук, професор кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-3945-788X. E-mail: ugnenko.ievgenia@gmail.com.

Сорочук Наталія Ігорівна, асистент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6042-2681. E-mail: nat.sorochuk50@gmail.com.

Коростельов Євген Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-9589-8196. E-mail: kostya_90@ukr.net.

Ужвієва Олена Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-3399-0472. E-mail: elena.uzhviieva.72@gmail.com.

Shariy Grygoriy, Dr. Sc. (Econ.), Professor, Head of the Department of Highways, Geodesy and Land Management of the Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. ORCID iD: 0000-0001-5098-2661.

Tel.: +38 (050) 850 44 44. E-mail: shariy.grigoriy61@gmail.com.

Ugnenko Yevgeniia, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0002-3945-788X. E-mail: ugnenko.ievgenia@gmail.com.

Sorochuk Nataliia, Assistant of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6042-2681.

E-mail: nat.sorochuk50@gmail.com.

Korostelov Yevhen Mykolaiovych, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0002-9589-8196. E-mail: kostya_90_@ukr.net.

Uzhviieva Olena, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0002-3399-0472. E-mail: elena.uzhviieva.72@gmail.com.

Статтю прийнято 11.12.2024 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 656.2:629.01

ТЕХНІЧНІ РЕГЛАМЕНТИ У СФЕРІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ. ЗАСТОСУВАННЯ РИЗИК-ОРІЄНТОВНИХ МЕТОДІВ ПІД ЧАС ПРОЄКТУВАННЯ

Старш. наук. співроб. Ж. О. Семко

TECHNICAL REGULATIONS IN THE FIELD OF RAILWAY TRANSPORT. APPLICATION OF RISK-ORIENTED METHODS DURING DESIGN

Senior Researcher, Mechanical Engineer Zh. O. Semko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320720>

Анотація. *Останнім часом у світі, що стрімко розвивається та змінюється в різних напрямках суспільного життя, дуже важливим стає питання ідентифікації, оцінювання та вжиття необхідних заходів щодо мінімізації або, у найкрайшому випадку, ліквідування ризиків, що виникають. Важливим аспектом здійснення безпечного функціонування залізничного транспорту є завчасне попередження виникнення відмов, особливо тих, наслідки за якими призводять до аварій чи навіть катастроф. У цьому сенсі актуальним стає питання щодо визначення ризиків настання таких подій. Задля вирішення цього завдання доцільне використання системи управління ризиками, ґрунтованої на застосуванні ризик-орієнтовного підходу в керуванні діяльністю підприємства будь-якої галузі будь-якої форми власності. Тому доречним стає розгляд нормативно-правових актів і нормативних документів, вимоги яких безпосередньо стосуються необхідності визначення ризиків, критеріїв їх ідентифікації та методів аналізу та оцінювання. У статті розглянуто необхідність виконання таких заходів у сфері залізничного транспорту з огляду на технічні регламенти, вимоги яких поширено на рухомий склад та інфраструктуру залізничного транспорту, зокрема оцінювання ризиків на всіх стадіях життєвого циклу об'єктів залізничного транспорту.*

Ключові слова: *ризик, технічний регламент, класифікація та критерії ризику, залізничний транспорт, об'єкти рухомого складу та інфраструктури, ризик-орієнтовний підхід.*

Abstract. *Recently, in a world that is rapidly developing and changing in various areas of public life, the issue of identifying, assessing and taking the appropriate measures to minimize or, at best, eliminate emerging risks has become very important.*

An important aspect of the safe operation of railway transport is the early prevention of failures, especially those whose consequences lead to accidents or even catastrophes. In this sense, the issue of determining the risks of the occurrence of such events becomes relevant. In order to solve this problem, it is advisable to use a risk management system based on the use of a risk-oriented approach in managing the activities of an enterprise in any branch of any form of ownership. Therefore, it is appropriate to consider the normative legal acts and regulatory documents, the requirements of which directly relate to the need to define risks, their identification criteria, and methods of analysis and evaluation. In addition, for risk identification it is important to determine the specific causes of the events according to their belonging to a certain area of occurrence: biological, environmental,

explosive, fire, mechanical, electrical, industrial, thermal. At the same time, for the final analysis and determination of measures to minimize or eliminate risks, it is necessary to conduct a quantitative assessment of risks with a sufficient degree of objectivity and effectiveness.

The article discusses the need to implement such measures in the field of railway transport in view of the technical regulations applicable to rolling stock and railway transport infrastructure, in particular, risk assessment at all stages of the life cycle of railway transport objects.

Keywords: *risk, technical regulation, risk classification and criteria, railway transport, objects of rolling stock and infrastructure, risk-oriented approach.*

Вступ. Прагнення України щодо вступу до Європейського Союзу, підтвержене підписанням Угоди про асоціацію між Україною, з одного боку, і Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншого боку [1] (далі Угода про асоціацію), окреслило певну кількість зобов'язань зі зміцнення «співробітництва у сфері технічного регулювання, стандартизації, ринкового нагляду, акредитації та робіт з оцінки відповідності з метою поглиблення взаєморозуміння відповідних систем та спрощення доступу до відповідних ринків» (пункт перший статті 55). Для виконання цього пункту Угоди про асоціацію [1] в Україні було прийнято Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» [2], сфера дії якого поширена на регулювання відносин, що «виникають у зв'язку з розробленням і ухваленням технічних регламентів і передбачених ними процедур оцінки відповідності, їх застосуванням стосовно продукції, яка вводиться в обіг, надається на ринку або вводиться в експлуатацію, а у випадках, визначених частиною другою статті 11 цього Закону, перебуває в експлуатації в Україні, а також здійсненням добровільної оцінки відповідності» (частина перша статті 2).

Метою Закону України [2] разом із положеннями Закону України «Про загальну безпечність нехарчової продукції» [3] є надання на ринку, введення в обіг та експлуатацію продукції, яка є безпечною щодо захисту життя і здоров'я людей, тварин і рослин, охорони довкілля та природних ресурсів, забезпечення

енергоефективності, захисту майна, забезпечення національної безпеки.

З урахуванням положень Угоди про асоціацію [1] і Закону [2] було розроблено зміни до технічних регламентів у сфері залізничного транспорту, затверджені Постановою Кабінету Міністрів України від 26 січня 2022 року № 53 «Про внесення змін до Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту і Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту» [4].

Щодо мети цієї роботи, то слід звернути увагу, що відповідно до змін [4] у Технічному регламенті безпеки рухомого складу залізничного транспорту [5] визначено таке:

1) безпека рухомого складу залізничного транспорту – стан рухомого складу залізничного транспорту, за якого відсутній непередбачуваний ризик, пов'язаний із можливістю завдання шкоди життю, здоров'ю та майну громадян під час надання послуг із перевезення пасажирів і вантажів залізничним транспортом (пункт 2);

2) рухомий склад залізничного транспорту з урахуванням відповідного ступеня ризику має забезпечувати біологічну, екологічну, вибухову, механічну, пожежну, промислову, термічну, електричну безпеку, а також електромагнітну сумісність і єдність вимірювання (пункт 17);

3) під час проєктування, виробництва, модернізації, монтажу, налагодження, введення в експлуатацію, експлуатації та ремонту рухомого складу залізничного транспорту слід визначити ступінь ризику розрахунковим та/або експериментальним

методами та/або експертним шляхом і/або за даними експлуатації аналогічних зразків рухомого складу залізничного транспорту. Рекомендації щодо оцінювання ступеня ризику зазначені в національних стандартах і/або технічних специфікаціях (пункт 18);

4) безпека рухомого складу залізничного транспорту з урахуванням ступеня ризику має бути забезпечена шляхом:

– проведення комплексу науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт під час проектування рухомого складу залізничного транспорту;

– використання апробованих технічних рішень;

– установлення строків експлуатації та/або гарантійних строків використання рухомого складу залізничного транспорту, а також визначення періодичності проведення його технічного обслуговування та ремонту;

– проведення комплексу необхідних розрахунків на підставі верифікаційних методів;

– вибору складових частин, матеріалів і речовин залежно від вимог та умов експлуатації рухомого складу залізничного транспорту;

– визначення критеріїв граничного стану рухомого складу залізничного транспорту;

– безумовного виконання проектних рішень, що перевіряють у період оцінювання відповідності рухомого складу залізничного транспорту;

– визначення умов і способів утилізації рухомого складу залізничного транспорту;

– оцінювання відповідності технічного, технологічного, організаційного, кваліфікаційного забезпечення безпеки рухомого складу залізничного транспорту (пункт 19).

Отже, передбачення, урахування, оцінювання та мінімізація виникнення або ліквідація ризиків відповідно до технічного регламенту [5] стає одним із головніших завдань упродовж життєвого циклу

рухомого складу залізничного транспорту, зокрема під час проектування, виробництва, модернізації, монтажу, налагодження, введення в експлуатацію, експлуатації та ремонту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Визначення меж безпеки рухомого складу, а саме біологічної, екологічної, вибухової, механічної, пожежної, промислової, термічної, електричної, створює як різноманітність критеріїв з визначення ризиків, так і певні труднощі в їх оцінюванні та поєднанні цих оцінок.

У роботі І. О. Ткаченко [6] під ризиком на залізничному транспорті розуміють «ймовірність втрат, збитків у процесі здійснення перевезень залізничними шляхами сполучення», а також наведено класифікацію ризиків, які на залізничному транспорті характеризуються складністю і різноманітністю за окремими найважливішими ознаками:

– об'єкт прояву;

– джерела виникнення;

– етапи транспортування;

– різновиди перевезень;

– можливість впливати на ризики;

– час виникнення;

– розмір збитків тощо.

Робота А. В. Рачинської [7] присвячена класифікації ризиків на залізничному транспорті, яка створює умови для підвищення економічної безпеки залізничного транспорту на основі організації страхового захисту. У статті визначено, що «під ризиком на залізничному транспорті розуміється ймовірність втрат, збитків у процесі здійснення перевезень залізничними шляхами сполучення» і наведено найбільш важливі ознаки класифікації ризиків на залізничному транспорті, крім таких, які наведені в роботі [6], ще й таку, як організація страхового захисту (8).

У статті О. О. Цвірко та Д. В. Крилова [8] надано карту ризиків, пов'язаних із різними сферами життя АТ «УЗ»: від

фінансової діяльності до технічного обслуговування локомотивів та інноваційного розвитку, визначено групи ризиків: макроекономічні, фінансові, ризики трудових ресурсів, регуляторні, політичні, техногенні та природно-кліматичні, науково-технічні та технологічні, ринкові.

К. В. Журавель у своїй статті [9] пропонує класифікацію ризиків, які виникають під час транспортного обслуговування на залізничному транспорті; класифікує ризики у транспортному обслуговуванні за двома етапами: визначення загальних ознак, характерних для ризиків у транспортному обслуговуванні – перший етап, розподілення ризиків залежно від характеру обліку (зовнішні, внутрішні), конкретизування й систематизація під певні цілі – другий етап; встановлює необхідність дослідження сукупності видів ризику, що супроводжують господарську діяльність підприємства залізничного транспорту на сучасному етапі розвитку вітчизняної економіки.

При цьому, слід зазначити, що в роботах [6, 7] виокремлено економічні наслідки настання подій, пов'язаних із певною ознакою ризику з наведених вище. Як найважливіші наслідки настання ризиків, автори оцінюють економічні збитки, що можуть бути спричинені технічними аваріями, природними катаклізмами, помилками виробничого персоналу, діями пасажирів. Автори робіт [8, 9] досліджують ризики, притаманні залізничному транспорту під час його експлуатації.

Слід також додати, що Постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 298 «Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності у сфері залізничного транспорту та визначається періодичність проведення планових заходів державного нагляду (контролю) Державною службою з безпеки на транспорті, та визнання такими, що

втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України» [10] визначено ризики настання негативних наслідків і критерії, за якими оцінюють ступінь ризику від провадження господарської діяльності у сфері залізничного транспорту, їхні показники та кількість балів за кожним показником (дод. 1 та 2 [10]).

Як події, що містять ризик настання негативних наслідків визначено [10]:

– зіткнення рухомого складу залізничного транспорту з іншим рухомим складом залізничного транспорту або автотранспортними засобами чи іншими самохідними машинами на залізничних переїздах або за їхніми межами;

– сходження рухомого складу залізничного транспорту;

– втрату небезпечних вантажів;

– несправність рухомого складу або об'єктів інфраструктури залізничного транспорту;

– порушення обов'язкових для дотримання всіма учасниками перевезення вимог щодо розміщення, закріплення вантажів, способу навантаження, розвантаження вагонів, убезпечення руху, збереження залізничного рухомого складу та вантажів;

– порушення графіка руху пасажирського або регіонального, або приміського, або міського поїзда у зв'язку з несправністю рухомого складу чи об'єктів інфраструктури залізничного транспорту, неналежні дії працівників залізничного транспорту.

Але для ризиків, наведених у цьому переліку, неможливо визначити конкретні причини настання подій за належністю до певної межі виникнення: чи то біологічна або екологічна, вибухова чи пожежна, або механічна чи електрична, або промислова, або термічна. Більш того, вони мають досить загальне визначення, що унеможливує проведення їхнього кількісного оцінювання з достатньою часткою об'єктивності та результативності для проведення остаточного аналізу та

визначення заходів з мінімізації або ліквідації ризиків.

Для отримання об'єктивних результатів оцінювання ризиків і ухвалення адекватних зрозумілих та ефективних рішень, спираючись на ці результати, запроваджують систему управління ризиками.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в наголошенні необхідності, визначенні технічними регламентами у сфері залізничного транспорту, оцінюванні ризиків задля забезпечення безпечного функціонування залізничного транспорту впродовж усього життєвого циклу, застосуванні ризик-орієнтовного підходу та виокремленні технічної складової системи управління ризиками. Завданням цієї роботи є висвітлення важливих аспектів зі створення об'єктів рухомого складу та інфраструктури з урахуванням вимог технічних регламентів у сфері залізничного транспорту щодо оцінювання ризиків із метою запобігання їм або мінімізації їх.

Основна частина дослідження. За ДСТУ ISO 9001 [11], організація в системі менеджменту якості має враховувати фактори та вимоги щодо діяльності, визначати ризики і можливості, які підлягають розгляду, планувати:

а) дії з розгляду цих ризиків і можливостей;

б) те, як:

1) інтегрувати і впровадити ці дії в процеси системи менеджменту якості;

2) оцінювати результативність цих дій.

З урахуванням можливого впливу ризиків і можливостей на відповідність продукції можуть бути ухвалені рішення про нові практики, запуск виробництва нової продукції, відкриття нових ринків, появу нових споживачів або користувачів, використання нових технологій із метою урахування потреб організації або споживачів чи користувачів продукції.

Загалом процес управління ризиками може містити:

- визначення сфери застосування;

- визначення критеріїв ризику;

- ідентифікацію ризику;

- аналіз частоти виникнення;

- аналіз наслідків;

- визначення рівня ризику;

- оцінювання ризику;

- оброблення ризику з метою ухвалення рішень про відповідні дії;

- моніторинг і перегляд ризику.

Основні результати оцінювання ризику:

- опис ризику та його можливого впливу на людей, об'єкти інфраструктури і рухомого складу, навколишнє середовище;

- виявлення важливих умов (причин), що сприяють виникненню ризику, а також недостатності зав'язків між різними об'єктами інфраструктури і рухомого складу або складовими одного об'єкта;

- порівняння з ризиками, характерними для альтернативних об'єктів або технологій виготовлення;

- сприяння в розподіленні пріоритетів;

- сприяння в попередженні небезпечних подій на підставі результатів вивчення подій, що вже відбулися;

- отримання інформації для оцінювання допустимості ризику після порівняння з попередньо встановленими критеріями;

- вибір оптимальних способів обробки ризику.

З оцінюванням ризику необхідно точно визначити:

- фактори діяльності та цілі організації;

- допустимі рівні ризиків, а також способи обробки ризиків, що перевищують допустимі;

- способи інтеграції оцінювання ризику в бізнес-процеси організації;

- методи оцінювання ризиків і їхньої ролі в процесі управління ризиками;

- ресурси, доступні для оцінювання ризиків;

- адміністративну структуру, відповідальність і повноваження персоналу, який оцінює ризики;

- способи складання звітності та перегляду результатів оцінювання ризику.

Відповідно до пункту 18 технічного регламенту [5] оцінюють ризики на всіх стадіях життєвого циклу залізничної техніки, а також якщо це визначено системою управління ризиками в рамках організації в цілому, окремих відділів, або проєктів чи процедур, або видів ризиків. При цьому залежно від вибраного масштабу використовують різні методи оцінювання ризиків.

Наприклад, у ДСТУ ISO 31010 [12] наведено цілу низку методів, що можуть бути застосовні для оцінювання ризиків з урахуванням факторів, що впливають на вибір методу їх оцінювання:

- складність проблеми і методів, необхідних для аналізу ризику;
- характер і ступінь невизначеності оцінки ризику, заснованої на доступній інформації та відповідності цілям,
- необхідні ресурси: часові, інформаційні тощо;
- можливість отримання кількісних оцінок вихідних даних.

Приклади методів оцінювання ризиків (але не всі, зазначені в роботі [10]) наведено в табл. 1, де для кожного з етапів оцінювання ризику вказано застосовність методу визначеними за шкалою ознаками: SA – строго застосовний, A – застосовний, NA – незастосовний.

Таблиця 1

Характеристика застосовності методів оцінювання ризику

Метод	Оцінювання ризику				
	Ідентифікація ризику	Аналіз ризику			Порівняльна оцінка ризику
		наслідки	імовірнісні характеристики	рівень ризику	
Мозковий штурм	SA ¹⁾	NA ²⁾	NA	NA	NA
Дельфі	SA	NA	NA	NA	NA
Дослідження небезпек і роботоздатності (HAZOP)	SA	A ³⁾	A	A	A
Аналіз видів і наслідків відмов (FMEA)	SA	SA	SA	SA	SA
Аналіз дерева несправностей (FTA)	A	NA	SA	A	A
Технічне обслуговування, направлене на забезпечення надійності	SA	SA	SA	SA	SA
Аналіз впливу людського фактора (HRA)	SA	SA	SA	SA	A
Індекси ризику	A	SA	SA	A	SA
Матриця наслідків і ймовірностей	SA	SA	SA	SA	A
Мультикритеріальний аналіз рішень (MCDA)	A	SA	A	SA	A

Застосування кожного з методів окремо не виключає можливості їх комбінації залежно від поставленої мети. Це може створити умови для отримання результатів оцінювання ризиків за багатьма критеріями, якщо взяти до уваги, що за життєвий цикл залізничного транспорту одночасне виникнення подій, спричинених різними ризиками, є досить поширеним явищем.

Узагалі досвід з оцінювання ризиків показує, що виникнення саме одного з

визначених та ідентифікованих ризиків може бути подією з малою часткою ймовірності, але значними наслідками, або подією, що трапляється дуже часто, але наслідки від її виникнення незначні. Тому за вже ustalеною практикою під час оцінювання ризиків проводять визначення ступеня загрози виникнення ризиків (табл. 2) і визначають відповідні дії (табл. 3), що потрібно виконати залежно від ступеня ризику, отриманого за розрахунками та аналізом.

Таблиця 2

Визначення ступеня загрози виникнення ризику

Значущість наслідків	Імовірність виникнення ризику		
	малоймовірно, ризик виникає досить рідко (1 бал)	дуже ймовірно, ризик виникає доволі часто (2 бали)	складова нормальної практики, ризик виникає постійно (3 бали)
Знижує ефективність процесу, але суттєво не впливає на його вихід (1 бал)	I (1) низький	II (2) середній	III (3) середній
Помітно погіршує вихід процесу, знижує його ефективність (2 бали)	II (2) середній	III (4) високий	III (6) високий
Унеможливорює нормальне функціонування процесу (3 бали)	II (3) середній	III (6) високий	IV (9) небезпечний

Таблиця 3

Дії, що потрібно виконати

Група	Рівень ризику		Потрібна дія
	R	критерій оцінювання	
1	2	3	4
I	1	Несуттєві ризики з низькою імовірністю виникнення, які не можуть призвести до значних наслідків	Періодичний перегляд Ризик не потребує відображення, але підлягає періодичному перегляду з метою недопущення втрати контролю за ризиками
II	2 або 3	Несуттєві ризики з низькою або середньою імовірністю виникнення, які можуть вплинути на діяльність, але не призводять до значних наслідків	Контроль Урахування наявності ризиків і їх постійне контролювання з метою забезпечення стабільності діяльності

1	2	3	4
III	4 або 6	Суттєві ризики з середньою або високою імовірністю виникнення, щодо яких неможливо точно визначити зовнішнє середовище виникнення, фактор збільшення імовірності та вплив небажаних наслідків	Швидка дія Розроблення заходів з управління ризиками для мінімізації наслідків
IV	9	Суттєві ризики з високою імовірністю виникнення, які можуть призвести до значних наслідків	Негайна реакція з боку керівництва з метою уникнення ризиків. Змінюють діяльність так, щоб значно зменшити ризик або уникнути його

У табл. 2 застосовано загальну практику позначень і визначення показників: R – рівень ризику,

$$R = F \cdot Z, \quad (1)$$

де F – бальна оцінка ймовірності виникнення ризику;

Z – бальна оцінка значущості наслідків виникнення ризику.

Вибір бальної оцінки ймовірності виникнення ризику та значущості наслідків його виникнення залежить від певної сфери, яку оцінюють, кількості отриманих об'єктивних даних про настання подій, загальноприйнятної практики для певної сфери та навіть суб'єктивного уявлення про показовість результатів.

Зазвичай для бальної оцінки вибирають числа від 1 до 10, але цілком може бути прийнятним і будь-який інший числовий ряд.

Під час вирішення питання, на що саме треба звернути увагу в разі визначення критеріїв ризику, перше, що спадає на думку, це визначення переліку характеристик, показників, властивостей об'єктів залізничного транспорту, що безпосередньо впливають на безпечне функціонування як всієї системи

залізничного транспорту в цілому, так і окремих її складових – так звані показники безпеки. Конкретний перелік елементів, що можуть бути причиною виникнення ризику, буде залежати від складності об'єкта, масиву достовірних даних про відмови, об'єктивної інформації про обсяги та періодичність планових, особливо позапланових, ремонтів, кількісної оцінки матеріальних, трудових, фінансових та інших витрат.

Перелік показників безпеки:

- дотримання габариту залізничного рухомого складу;
- виконання умов експлуатації з урахуванням зовнішніх кліматичних і механічних впливів;
- технічна сумісність з інфраструктурою та іншим рухомим складом, експлуатованим на цій інфраструктурі;
- стійкість від сходу колеса з рейки;
- зчеплення в поїздах для передавання динамічних зусиль у режимі тяги та гальмування;
- допустимий гальмівний шлях;
- відповідність гранично допустимим зусиллям тяги, гальмування та величині прискорень;
- міцність за допустимих режимів навантаження та впливів;

– відсутність пластичних деформацій у разі прикладення повздовжніх і вертикальних розрахункових динамічних навантажень;

– опір втомі в разі малоциклових і багатоциклових режимів навантаження;

– збереження зчеплення одиниць залізничного рухомого складу під час проходження криволінійних ділянок колії;

– безпека та надійність роботи електрообладнання у всьому діапазоні режимів експлуатації (за номінальних і граничних режимів електропостачання);

– електромагнітна сумісність електрообладнання рухомого складу з пристроями залізничної автоматики і телемеханіки,

залізничного електрозв'язку інфраструктури.

Слід також додати, що в постанові [4] щодо змін, що внесені до технічних регламентів у сфері залізничного транспорту і набудуть чинності у травні 2025 року, наведено положення про застосування модулів оцінювання відповідності у сфері залізничного транспорту, які затверджено постановою КМУ від 3 жовтня 2018 р. № 797 (далі Постанова № 797) [13].

У модулях оцінювання відповідності [13] визначено умови про підтвердження відповідності (табл. 4).

Таблиця 4

Модулі оцінювання відповідності та вимоги, що стосуються оцінювання ризиків

Модуль оцінювання відповідності	Номер пункту і його зміст, за Постановою № 797 [13]	
Модуль SD (оцінювання відповідності на основі системи управління якістю процесу створення та/або утримання підсистеми у відповідному стані)	149	Технічна документація, яка супроводжує декларацію про відповідність підсистеми, має містити: ... звіти згідно з методами загальної безпеки оцінювання ризиків
Модуль SF (оцінювання відповідності на основі перевірки підсистеми)	159	Заявник надає звіти згідно з методами загальної безпеки оцінювання ризиків
Модуль SG (оцінювання відповідності на основі перевірки окремої підсистеми)	167	Технічна документація має такі елементи: ... звіти згідно з методами загальної безпеки оцінювання ризиків
Модуль SH1 (оцінювання відповідності на основі повної системи управління якістю процесу створення та/або утримання підсистеми у відповідному стані і дослідження проекту)	188	Заявка передбачає оцінювання відповідності вимогам нормативних документів таких стадій функціонування підсистеми, як проєкт, створення, експлуатація, технічне обслуговування, і включає ... звіт оцінювача згідно з методами загальної безпеки оцінювання ризиків у разі безпечної інтеграції в залізничну систему складової та/або підсистеми

Виходячи зі змісту положень Постанови № 797 [13] наявність документів, що засвідчують аналіз і оцінювання ризиків,

стає обов'язковим у разі оцінювання відповідності об'єктів залізничного транспорту вимогам технічних регламентів

у сфері залізничного транспорту. Ці положення стосуються як рухомого складу, так і елементів інфраструктури. Крім того, визначення ризиків і їх оцінювання слід проводити на всіх стадіях життєвого циклу об'єктів рухомого складу та інфраструктури залізничного транспорту. Загальний перелік стадій життєвого циклу, за ДСТУ ГОСТ 31538 [14]: визначення вихідних вимог (технічне завдання); розроблення (конструкторська, технологічна документація, нормативні документи); виробництво (з проведенням відповідного контролю та випробувань); експлуатація (у тому числі процеси технічного обслуговування та ремонту); модернізація; утилізація.

Об'єкти залізничного транспорту, що увійшли до Переліку рухомого складу та його складових частин, що підлягають оцінюванню відповідності, наведено в дод. 1 до Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту [5], підпадають під обов'язкове оцінювання відповідності вимогам цього технічного регламенту. Але слід зазначити, що, за частиною другою статті 24 Закону [2], можливе оцінювання відповідності на добровільних засадах, у будь-яких формах, включаючи випробування, декларування відповідності, сертифікацію та інспектування, і відповідність будь-яким заявленим вимогам.

Особливо важливим є урахування відповідних передбачуваних ризиків, що має бути здійснено відповідно до ДСТУ ГОСТ 31538 [14] під час ухвалення рішення про постановку продукції на виробництво та розроблення технічного завдання на проведення дослідно-конструкторської роботи зі створення або модернізації залізничного рухомого складу.

Розроблення залізничного рухомого складу загалом включає такі етапи:

1) формування концепції проекту зі створення нового залізничного рухомого складу (якщо це проголошено в основних положеннях договору на поставку

залізничного рухомого складу), яка містить пропозиції:

- про проектування залізничного рухомого складу в цілому, окремих його складових і систем, які забезпечують його функціонування;

- організацію виробництва та експлуатації залізничного рухомого складу;

2) проведення патентних досліджень;

3) теоретичні та експериментальні дослідження з визначення раціональних конструкційних і технологічних рішень;

4) розрахунки необхідних показників надійності, які відповідають технічним вимогам на залізничний рухомий склад;

5) деталізоване прогнозування вартості життєвого циклу залізничного рухомого складу з урахуванням оцінки невизначеності й ризиків;

б) оцінювання затрат на технічне обслуговування та ремонт кожної з основних складових залізничного рухомого складу;

7) формування технічного завдання за результатами досліджень, що передбачають реалізацію технічних вимог і визначають необхідні та достатні умови щодо розроблюваного типу залізничного рухомого складу.

Якщо йдеться про модернізацію залізничного рухомого складу, то мають бути виконані всі перелічені вище етапи.

Отже, оцінювання ризиків під час створення нового або модернізації наявного залізничного рухомого складу стає вагомим складовою у визначенні доцільності розроблення або модернізації з урахуванням умов впродовж усього життєвого циклу.

Висновки:

- створена на сьогодні система управління ризиками, що впроваджена АТ «Українська залізниця», направлена на мінімізацію або запобігання ризикам, що виникають або можуть виникнути під час експлуатації рухомого складу і об'єктів інфраструктури залізничного транспорту;

- життєвий цикл системи залізничного транспорту в цілому і її окремих складових

(підсистеми, одиниці рухомого складу, елементи інфраструктури) не обмежений лише умовами експлуатації. До стадій життєвого циклу входять також процеси проєктування, виробництва, модернізації, здійснення яких теж супроводжено виникненням певних ризиків. Тому необхідним є визначення та оцінювання ризиків під час кожної зі стадій життєвого циклу;

- впровадження системи управління ризиками на всіх стадіях життєвого циклу

системи залізничного транспорту, застосування методів мінімізації або ліквідування ризиків дасть змогу значно підвищити ефективність і рівень безпечного функціонування залізничного транспорту, створити умови для зменшення обсягів різного роду витрат, визначити перспективні напрями модернізації і створити умови для впровадження енергозберігаючих процесів.

Список використаних джерел

1. Угода про асоціацію між Україною з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: Закон України від 16 вересня 2014 р. № 1678-VII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text.

2. Про технічні регламенти та оцінку відповідності: Закон України від 15 січня 2015 р. № 124-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19#Text>.

3. Про загальну безпечність нехарчової продукції: Закон України від 2 грудня 2010 р. № 2736-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2736-17#Text>.

4. Про внесення змін до Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту і Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту: Постанова Кабінету Міністрів України від 26 січня 2022 р. № 53. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/53-2022-%D0%BF#Text>.

5. Про затвердження Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту: Постанова Кабінету Міністрів України від 30 грудня 2015 р. № 1194. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1194-2015-%D0%BF#Text>.

6. Ткаченко І. О. Ризики у транспортних процесах : навч. посіб. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. С. 20–22.

7. Рачинська А. В. Класифікація ризиків на залізничному транспорті як основа формування системи економічної безпеки його функціонування. *Економіка і суспільство*. 2016. № 6. С. 81–87.

8. Цвірко О. О., Крилов Д. В. Система управління ризиками на залізничному транспорті. *Економіка та управління підприємствами*. 2021. Вип. 58. С. 66-71. DOI: <https://doi.org/10.32843/infrastruct58-13>.

9. Журавель К. В. Сутність та класифікація ризиків при транспортному обслуговуванні на залізничному транспорті. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2008. № 628 : Проблеми економіки та управління. С. 95–101.

10. Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності у сфері залізничного транспорту та визначається періодичність проведення планових заходів державного нагляду (контролю) Державною службою з безпеки на транспорті, та визнання такими, що втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України: Постанова Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 298. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/298-2019-%D0%BF#Text>.

11. ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT). Системи управління якістю. Вимоги. Чинний від 01.07.2016. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 32 с.

12. ДСТУ EN IEC 31010:2022 (EN IEC 31010:2019, IDT; IEC 31010:2019, IDT). Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику. Чинний від 01. 07.2014. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2014. 80 с.

13. Про затвердження модулів оцінки відповідності у сфері залізничного транспорту: Постанова Кабінету Міністрів України від 03 жовтня 2018 р. № 797. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/797-2018-%D0%BF#Text>.

14. ДСТУ ГОСТ 31538:2016 (ГОСТ 31538-2012, IDT). Цикл життєвий залізничного рухомого складу. Загальні вимоги. Чинний від 2016-10-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 13 с. (Національні стандарти України).

Семко Жанна Олександрівна, старший науковий співробітник наукового підрозділу «Орган з сертифікації», ДП «Український науково-дослідний Інститут вагобудування», м. Кременчук, Полтавська обл., Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0047-8509>. Тел.: + 38 (095) 543 73 17. E-mail: shaganne@gmail.com.

Semko Zh. O., senior researcher of the scientific division «Certification Authority», State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute», Kremenchuk, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0047-8509>. Tel: +38 (095) 543 73 17. E-mail: shaganne@gmail.com.

Статтю прийнято 12.12. 2024 р.

УДК 656.1/4:614.8

БЕЗПЕКА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Д-р техн. наук Ю. В. Буц, кандидати техн. наук А. О. Каграманян, Д. С. Козодой, О. В. Крайнюк, канд. екон. наук Н. В. Гриценко

SAFETY OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE OPERATION IN MARTIAL STATE

Doctor (Techn) Y. V. Buts, Phd (Techn) A. O. Kahramanyan, Phd (Techn) D. S. Kozodoy, Phd (Techn) O. V. Krainyuk, Phd (Ekon) N. V. Hrytsenko,

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320730>

***Анотація.** Розглянуто передумови формування нової національної системи запобігання професійним ризикам шляхом впровадження на законодавчому рівні ризик-орієнтованого підходу у сфері організації безпеки та здоров'я працівників, що є суттєвою передумовою вступу України до ЄС. Суттєва частка випадків виробничого і невиробничого травматизму в умовах запровадження воєнного стану стосується транспортної діяльності підприємств транспортної інфраструктури, зокрема критичної, а також установ, що реалізують вантажні і пасажирські перевезення, і решти підприємств та організацій галузі, які тримають на своєму господарчому балансі автомобільні транспортні засоби і застосовують їх для внутрішніх запитів підприємства чи організації. Теоретично доведено, що забезпечення безпеки та здоров'я працівників під час воєнного стану допомагає швидко впроваджувати важливі заходи. У статті визнано, що транспортні засоби, водії (зокрема машиністи, поїзні бригади тощо) і пересічні громадяни (пасажирів) під час ведення бойових дій можуть зазнати специфічних небезпек воєнного часу. В умовах запровадження воєнного стану важливою є*

реалізація запропонованих у статті заходів щодо зменшення ризиків пошкодження чи виробничих аварій на підприємствах транспортної інфраструктури та мінімізації негативних наслідків їх впровадження. У зв'язку з тим, що транспортні підприємства віднесені до об'єктів критичної інфраструктури, які працюють в умовах кризової ситуації (воєнного стану), на них покладено насамперед основну евакуаційну роль. Підприємствам залізничного транспорту також відведено додаткову роль переміщення, а саме релокаційну. Також у статті сформовані специфічні небезпеки для працівників в умовах воєнного часу і заходи для забезпечення діяльності підприємств критичної транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану. Завдяки цьому можна поліпшити налагодження логістичних зв'язків, що є вирішальним аспектом запропонованих заходів.

Ключові слова: безпека та здоров'я працівників, професійні ризики, підприємства критичної транспортної інфраструктури, воєнний стан.

Abstract. *The prerequisites for the formation of a new national system for preventing occupational risks by implementing a risk-oriented approach in the field of organizing the safety and health of workers at the legislative level, which is an essential prerequisite for Ukraine's accession to the EU, are considered. A significant proportion of cases of industrial and non-industrial, including cases of injuries in the conditions of the introduction of martial law, belong to the transport activities of transport infrastructure enterprises, in particular critical ones. As well as to institutions that implement freight and passenger transportation, and other enterprises and organizations of the industry that keep motor vehicles on their balance sheet and use them for internal requests of the enterprise or organization. It is theoretically proven that ensuring the safety and health of workers during martial law helps to quickly implement important measures. The article recognizes that vehicles, their drivers (in particular, drivers, train crews, etc.) and ordinary citizens (passengers) are exposed to specific dangers of wartime during hostilities. In the conditions of the introduction of martial law, it is important to implement the measures proposed in this article to reduce the risks of damage or industrial accidents at transport infrastructure enterprises and minimize the negative consequences of their implementation. Due to the fact that transport enterprises are classified as critical infrastructure facilities that operate in a crisis situation under martial law, they are primarily assigned the main evacuation role. Railway transport enterprises are also assigned an additional role of movement, namely relocation. Also, the article forms specific dangers for workers in wartime and forms measures to ensure the safety of the activities of critical transport infrastructure enterprises under martial law. This will improve the establishment of logistical connections, which is a crucial aspect of the proposed measures.*

Keywords: *safety and health of workers, occupational risks, critical transport infrastructure enterprises, martial law.*

Вступ. Загальновідомо, що 16 жовтня 2023 р. Кабінетом Міністрів України зареєстровано у Верховній Раді України проєкт Закону України «Про безпеку та здоров'я працівників на роботі» (№ 10147) [1]. Законопроєкт спрямований на формування нової національної системи запобігання професійним ризикам шляхом впровадження на законодавчому рівні ризик-орієнтованого підходу у сфері організації безпеки і здоров'я працівників та

імплементатії положень Директиви Ради 89/391/ЄЕС від 12.06.1989 р. про запровадження заходів, покликаних заохочувати до покращення безпеки та охорони здоров'я працівників на роботі [2].

Проєктом цього законодавчого акта пропонується запровадити нову національну систему запобігання виробничим ризикам, засновану на принципах оцінювання, контролю ризиків і управління ними, які є базовими для побудови подібних систем у

розвинених країнах Європи та світу. Послідовна ієрархія цих принципів визначена Директивою Ради № 89/391/ЄЕС і передбачає [2];

- оцінювання ризиків, яких не можна уникнути;

- усунення джерел ризиків;

- запобігання ризикам;

- заміну устаткування підвищеної небезпеки на безпечне або менш небезпечне;

- адаптацію умов праці до працівника, особливо під час облаштування робочих місць, вибору виробничого обладнання, методів роботи;

- адаптацію до технічного прогресу;

- надання заходам колективного захисту пріоритету перед заходами індивідуального захисту, що використовують працівники;

- належне навчання та інструктаж працівників;

- розроблення узгодженої загальної політики запобігання виробничим ризикам, що охоплює техніку, організацію праці, умови праці, соціальні відносини та вплив чинників, пов'язаних із виробничим середовищем.

Проектом нормативно-правового акта передбачено впровадити нові механізми регулювання ринку послуг, які надають у сфері безпеки та здоров'я працівників на роботі, зокрема це стосується:

- проведення гігієнічних досліджень умов праці;

- проведення технічного огляду робочого обладнання підвищеної небезпеки;

- проведення експертизи щодо спроможності роботодавця забезпечити безпечне виконання робіт підвищеної небезпеки;

- проведення навчання з питань безпеки та здоров'я працівників на роботі.

Дія цього Закону поширена на всіх працівників і роботодавців незалежно від форми власності та виду діяльності. Іншими законами можуть бути встановлені

особливості регулювання відносин у сфері безпеки та здоров'я працівників на роботі з урахуванням норм цього Закону, не допускаючи звуження змісту і обсягу визначених ним прав, гарантій та обов'язків у цій сфері.

Дія цього Закону не поширена на військовослужбовців, поліцейських, осіб рядового та начальницького складу, осіб, які мають спеціальні звання, державних, правоохоронних органів і військових формувань, утворених відповідно до законодавства України.

Відносини у сфері безпеки та здоров'я осіб, зазначених у частині другій цієї статті, регульовані законами України у відповідній сфері, указами Президента України, нормативно-правовими актами Кабінету Міністрів України, державних, правоохоронних органів, органів влади, де проходять службу такі особи. Під час розроблення та прийняття нових або внесення змін до нормативно-правових актів, зазначених у першому реченні цієї частини, безпека та здоров'я зазначених осіб мають бути забезпечені наскільки це можливо, з урахуванням положень цього Закону.

Проектом Закону пропонується внести такі зміни:

- замінити слова «безпека праці» або «охорона праці» європейським терміном «безпека працівника»;

- замінити назву центрального органу виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері охорони праці, на центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері безпеки та здоров'я працівників на роботі;

- встановити відповідальність за порушення вимог безпеки і захисту здоров'я працівників на роботі від ризиків, що виникають або можуть виникнути у вибухонебезпечному середовищі.

Реалізація законодавчої ініціативи дасть змогу забезпечити збереження життя і здоров'я громадян, як найвищу соціальну цінність, гарантувавши їм право на належні,

безпечні та здорові умови праці; підвищити ефективність діяльності інспекції праці; спростити законодавства щодо безпеки та гігієни праці, зменшити адміністративне і регуляторне навантаження на роботодавця; сприятиме посиленню чесної конкуренції, розширенню доступу українських підприємств до міжнародного ринку та підвищенню їхньої конкурентоспроможності на такому ринку; покращити інвестиційний клімат в Україні; поступово імплементацію норм Європейського Союзу в національне законодавство; сприятиме забезпеченню сприятливого середовища для провадження господарської діяльності; створення умов для розвитку малого і середнього бізнесу [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання безпеки діяльності підприємств критичної транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану на сьогодні не дуже поширене, воно тільки набирає оберти. Однак деякі вчені: В. П. Садковий, В. П. Зосімов, Л. В. Ушаков, О. П. Євсюков, В. В. Могильниченко [4-6], все ж таки розглядали це питання у своїх працях і займалися розв'язанням основних завдань.

Ураховуючи безліч особливостей за воєнного часу, які впливають на безпеку діяльності підприємств критичної транспортної інфраструктури, питання розроблення заходів, які будуть пристосовані саме до сьогоденного непростого стану держави, так і залишається відкритим. Виходячи з цього, є твердження, що це наукове дослідження є актуальним і заслуговує на більш детальний теоретичний розгляд і має практичне значення для безпеки діяльності підприємств критичної транспортної інфраструктури.

Визначення мети та завдання дослідження полягає у формуванні нової національної системи запобігання професійним ризикам шляхом впровадження на законодавчому рівні ризик-орієнтованого підходу у сфері організації безпеки та здоров'я працівників.

Основна частина дослідження.

Постановкою завдання дослідження є аналіз забезпечення діяльності підприємств критичної транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану. Вирішити завдання пропонувано через оцінювання специфічних небезпек, під дію яких підпадають працівники транспортної галузі під час ведення воєнних дій. Також доцільно запропонувати заходи щодо забезпечення діяльності підприємств критичної транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану. З метою вирішення поставленого завдання необхідно розглянути специфічні небезпеки працівників транспортної галузі під час ведення воєнних дій. Забезпечення безпеки і здоров'я працівників на роботі в мирний час потребує суттєвих напружень, запровадження інноваційних методів управління, технологій і ресурсів. В умовах воєнного стану діяльність суб'єктів господарювання вкрай ускладнюється. Безумовно, не йдеться про тимчасово окуповані території, однак навіть на умовно безпечних і контрольованих територіях України це позначається також на управлінні безпекою працівників на роботі, як структурного елемента загальної системи управління виробництвом. Це пов'язано з тим, що більшість громадян України раптово наражається на донині незнайомі небезпечні та неконтрольовані загрози і небезпеки [7-10].

Робоче місце враз стає щонайбільше небезпечним і підступним, і настає необхідність занадто енергійно ухвалювати відповідальні резолюції. У переважній більшості випадків працівники та професійні спілки не сприймають дійсність, знаходяться у стані стресу і ставляться до цього як до тимчасової події. Більшість працівників не готові до ведення бойових дій на території, де вони працюють, на жаль, і не готові до відповідних дій за цих умов. Для систематичності управління безпекою і здоров'ям працівників на роботі воєнні дії стають повноцінними зовнішніми

небезпечними чинниками виробничої діяльності та життєвих побутових ситуацій. Вони докорінно трансформують зовнішню і внутрішню структурну організацію установи чи підприємства та підіймають рівні ризиків трапляння додаткових невідомих до цього нещасних випадків на виробництві. Ці випадки не притаманні для мирного періоду діяльності підприємств і мають насамперед суттєві наслідки різних ступенів тяжкості. У нашій державі від 24 лютого 2022 р. нещасні випадки зі смертельними нещасними випадками, пов'язаними з воєнними діями, становлять переважну чисельність загального смертельного травматизму на робочих місцях під час агресії військ російської федерації [11].

Забезпечення безпеки і здоров'я працівників на роботі під час впровадження воєнного стану сприяє введенню пріоритетних заходів і потребує невідкладних рішень окреслених питань, у тому числі з обґрунтованого науково-методичного забезпечення безпеки і здоров'я працівників на роботі. Значне сприяння щодо цього питання приділяють міжнародні і місцеві гуманітарні та волонтерські організації, які систематично проводять роз'яснювальну роботу, навчальні тренінги та доступну наочну агітацію для мешканців прилеглих до виробничих територій, і насамперед працівників підприємств, установ та організацій, які функціонують у період впровадження воєнного стану [12].

Слід зазначити, що дієва позитивна співпраця гуманітарних і громадських організацій із територіальними державними органами виконавчої влади у сфері безпеки і здоров'я працівників на роботі є пріоритетною і визначальною. Урахуємо, що без неї є значна ймовірність того, що зазначені підходи та методи управління безпекою будуть розвиватися непередбачувано, територіально та з запізненням, крім того, часто паралельно, без узгодження з місцевою владою і необхідного обміну практичними знаннями

та перевіреними досвідом. Суттєва частка випадків виробничого і невиробничого випадків травматизму в умовах запровадження воєнного стану належить до транспортної діяльності підприємств транспортної інфраструктури, зокрема критичної, а також установ, що реалізують вантажні і пасажирські перевезення, і решти підприємств та організацій галузі, які тримають на своєму господарчому балансі автомобільні транспортні засоби і застосовують їх для внутрішніх запитів підприємства чи організації.

Окремо зазначимо, що під час ведення бойових дій війни залізничний і автомобільний транспорт стає стратегічним державним ресурсом підприємств галузі, оскільки має подвійну роль:

- пряму – підприємство використовує транспортні засоби для перевезення вантажів і пасажирів у штатному режимі, працюючи на порівняно безпечній території або відновлюючи власну діяльність на звільнених чи деокупованих територіях;

- непряму (евакуаційну) – евакуація насамперед працівників самого підприємства і цивільного навколишнього населення із зони активних бойових обстрілів чи дій.

Транспортні засоби, водії (машиністи, бригади потягів тощо) і пересічні громадяни (пасажирів) під час бойових дій наражаються на своєрідні (специфічні) небезпеки воєнного часу, як показано на рис. 1.

Із наведеного вище пропонуємо заходи убезпечення діяльності підприємств критичної транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану. Для зниження ризику реалізації негативних результатів зазначених вище небезпек фахівцям критичної транспортної інфраструктури потрібно належним чином ідентифікувати і оцінити ці ризики, управляти ними в ефективному (оперативному) режимі та реалізувати першочергові заходи:

- створення достатнього запасу запчастин і витратних матеріалів (зокрема паливно-мастильних ресурсів), потрібних

для експлуатації та ремонту транспортних засобів, забезпечити їх оперативне поповнення;

- заборону переміщення та руху ТЗ на територіях, де відбувалися воєнні дії, особливо за умови, що там не здійснювали розмінування чи перевірку на наявність вибухонебезпечних предметів;

- сумлінне прокладання безпечних маршрутів, забезпечення постійного зв'язку з машиністом чи водієм, результативне

корегування маршрутів у разі виникнення чи прояву небезпечної ситуації;

- розроблення, затвердження та впровадження в діяльність чіткого алгоритму дій машиніста чи бригади поїзда під час загрози повітряної тривоги або ракетного обстрілу;

- забезпечення справного стану транспортних засобів, а також їхню постійну готовність для термінової евакуації [13].

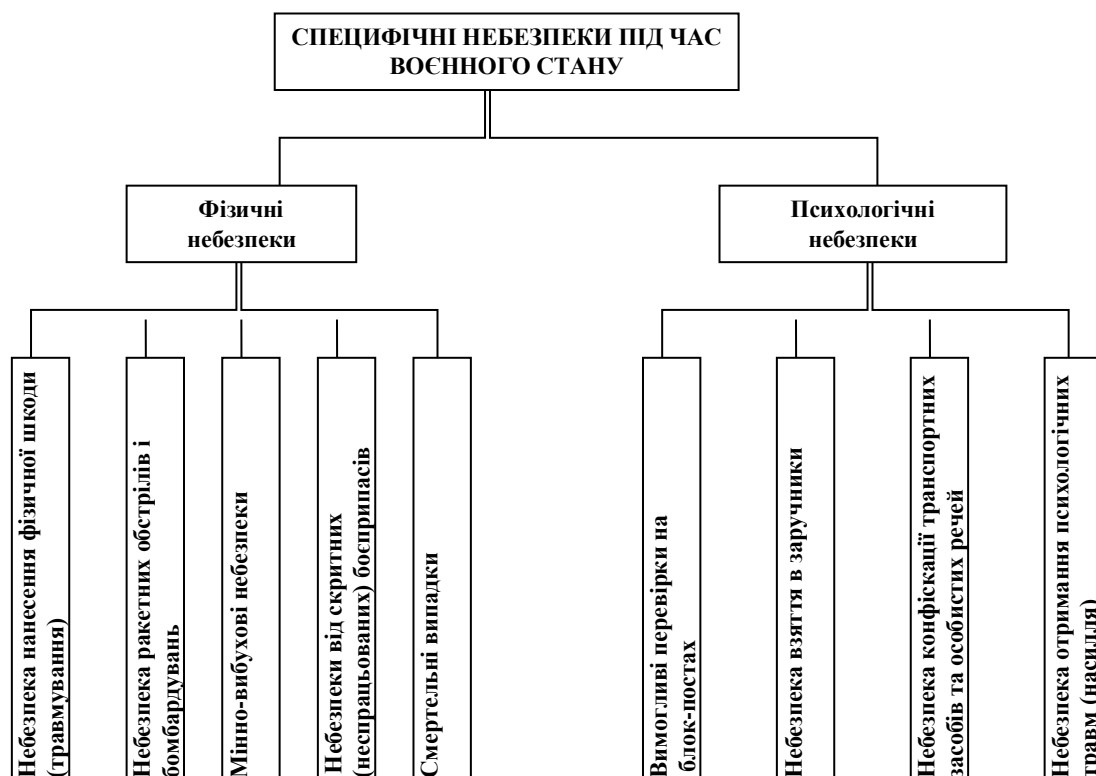


Рис. 1. Специфічні небезпеки для працівників в умовах воєнного часу

Якщо взяти до уваги той факт, що транспортні підприємства віднесено до об'єктів критичної інфраструктури, які за воєнного стану працюють у режимі кризової ситуації, насамперед їм відведено головну евакуаційну роль, а у випадку з підприємствами залізничного транспорту – додатково ще й релокаційну. В умовах дії воєнного стану для зниження ризиків ураження чи промислових аварій підприємств транспортної інфраструктури

та мінімізації негативних наслідків їх реалізації необхідно провести заходи, подані на рис. 2.

Як видно з рис. 2, найкращим запропонованим заходом для збереження об'єктів транспортної інфраструктури, їхнього виробничого потенціалу та мінімізації виникнення надзвичайних ситуацій є релокація підприємств галузі в безпечні регіони. У цьому випадку беззаперечним завданням державних

органів влади є створення взаємного діалогу в певній сфері для надання першочергової підтримки суб'єктам господарювання:

- налагодження логістичних зв'язків, наприклад призначення додаткових потягів на залізничному транспорті тощо;

- розміщення виробничого обладнання, своєчасний монтаж і запуск потужностей;

- безпечне розселення працівників галузі та забезпечення їхніх соціально-економічних гарантій і прав [14].



Рис. 2. Заходи для забезпечення діяльності підприємств критичної транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану

Для належної діяльності об'єктів критичної транспортної галузі як за їхньою евакуаційною функцією, так і прямим призначенням необхідна належна дорожньо-транспортна інфраструктура. Сюди слід віднести і наявність залізничних колій, доріг різного призначення, дорожньо-транспортні споруди, а також мости, шляхопроводи, транспортні розв'язки, електроосвітлення [15]. В умовах воєнного стану ці об'єкти підлягають критичним руйнуванням, насамперед у результаті масштабних обстрілів, і потребують оперативної відбудови.

Працівники підприємств критичної транспортної інфраструктури, задіяні на роботах із відбудови цілісності об'єктів

галузі, потрапляють під дію тих самих характерних небезпек воєнного стану, що і машиністи чи водії транспортних засобів. Такі ж небезпеки існують у разі ліквідації наслідків обстрілів, а також під час розбору завалів, а ризик опинитися під обстрілами чи бомбардуванням суттєво зростає, якщо врахувати умови праці (відкрита територія, висотні роботи тощо). Таку специфіку потрібно обов'язково враховувати разом зі штатними умовами праці, зокрема під час ідентифікації та оцінювання ризиків і розроблення заходів щодо управління ними.

Висновки. Формування нової національної системи запобігання професійним ризикам шляхом впровадження на законодавчому рівні

ризик-орієнтованого підходу у сфері організації безпеки та здоров'я працівників та імплементації положень Директиви Ради 89/391/ЄЕС від 12.06.1989 р. про запровадження заходів, покликаних заохочувати до покращення безпеки та охорони здоров'я працівників на роботі, є суттєвою передумовою вступу України до ЄС.

Суттєва частка випадків виробничого і невиробничого випадків травматизму в умовах запровадження воєнного стану стосується транспортної діяльності підприємств транспортної інфраструктури, зокрема критичної, а також установ, що реалізують вантажні і пасажирські перевезення, і решти підприємств та організацій галузі, які тримають на своєму господарчому балансі автомобільні транспортні засоби і застосовують їх для

внутрішніх запитів підприємства чи організації. Технічні засоби, водії (машиністи, бригади потягів тощо) і пересічні громадяни (пасажирів) під час бойових дій наражаються на своєрідні (специфічні) небезпеки воєнного часу.

Якщо взяти до уваги той факт, що транспортні підприємства віднесено до об'єктів критичної інфраструктури, які за воєнного стану працюють у режимі кризової ситуації, насамперед їм відведено головну евакуаційну роль, а у випадку з підприємствами залізничного транспорту – додатково ще й релокаційну.

В умовах дії воєнного стану для зниження ризиків ураження чи промислових аварій підприємств транспортної інфраструктури та мінімізації негативних наслідків їх реалізації необхідно провести запропоновані у статті заходи.

Список використаних джерел

1. Про безпеку та здоров'я працівників на роботі: проєкт Закону України від 13.10.2023 р. № 10147. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/Л10117А?an=2>.
2. Директива Ради 89/391/ЄЕС про впровадження заходів для заохочення вдосконалень у сфері безпеки та охорони здоров'я працівників під час роботи. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_b23#Text.
3. Krainiuk O. V., Kozodoi D. S., Barbashyn V. V. Evaluation of emergency events during the transport of dangerous goods in the context of the technogenic load of regions. *Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipro National University of Railway Transport*. 2018. 3 (75). P. 27-35.
4. Могильниченко В. В. Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій. Техногенна та природна небезпека. Організація управління в надзвичайних ситуаціях / за заг. ред. В. В. Могильниченка. Київ: КІМ, 2007. Т. 1. 636 с.
5. Зосімов В. П., Садковий В. П., Ушаков Л. В. Управління та організація діяльності у сфері цивільного захисту: практ. посіб. Харків: УЦЗУ, 2006. 370 с.
6. Євсюков О. П., Садковий В. П. Специфіка особистісних змін, що відбуваються з людьми, які пережили психічну травму. *Проблеми екстремальної та кризової психології*. 2010. Вип. 7. С. 120-128.
7. Krainiuk O., Buts Y., Didenko N., Barbashyn V. Metrological support for the certification of workplaces by working conditions. *Municipal economy of cities*. 2023. 4 (178). 286–292. [https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-286-292.\(2023\)](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-286-292.(2023)).
8. Krainiuk O. V., Buts Y. V., Barbashyn V. V., Yatsiuk M. V. The use of artificial intelligence for labour safety management. *Municipal economy of cities Scientific and technical collection. Series: Technical sciences and architecture*. 2023. Vol. 6, is. 180. P. 207-214.
9. Buts Y. V., Krainiuk O. V. Topical issues of road safety and analysis of road accidents in Ukraine. *Scientific and production journal 'Avtoshlyakhovyk Ukrainy'*. 2023. Special issue 277'. P. 98-102.

10. Mental health and psychosocial support work. Part of the 4th edition of the UNHCR Emergency Handbook. URL: <https://emergency.unhcr.org/entry/49304/mental-health-and-psychosocial-support>.

11. Оперативна інформація про нещасні випадки. URL: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1nurNVy_10NOqJ9GujloAhnkRNG3vSGoZoLGYgeTw-O4/edit#gid=834046324.

12. Як буде відбудовуватись Україна? Від знання про ризики – до сталого відновлення. URL: <https://r2p.org.ua/vid-znannya-pro-ryzyky-do-stalogo-vidnovlennya/>.

13. Kyrlyk N. Yu. Artificial Intelligence' and its use in logistics processes. *Actual Problems in Economics*. 243/244 (2021): 59-66.

14. Prospects for the «green» logistics as a safety factor in multimodal transportation of dangerous goods / Denis Lomotko, Oleksandr Ohar, Dmytro Kozodoi, Vitalii Barbashyn, Mykola Lomotko. *Transportation ways. Traffic safety and transport management. AIP Conf. Proc.* 2684, 020008 (2023). P. 123-142. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0120066> <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2684/1/020008/2893743/Prospects-for-the-use-green-logistics-as-a-safety>.

15. Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of mining and smelting enterprises (Article) / S. V. Panchenko, T. V. Butko, A. V. Prokhorchenko, L. O. Parkhomenko. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. Is. 2. P. 93-99.

Буч Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID: 0000-0003-0450-2617. Тел.: +38(050)-683-08-99. E-mail: buc@kart.edu.ua.

Каграманян Артур Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, проректор з науково-педагогічної роботи, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID: 0000-0003-3520-4911. Тел.: +38(050)-630-31-60. E-mail: kartal@kart.edu.ua.

Козодой Дмитро Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри охорона праці та навколишнього середовища, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID: 0000-0003-0450-2617. Тел.: +38(050)-066-519-47-31. E-mail: dmitry_1980@ukr.net.

Крайнюк Олена Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри метрології та безпеки життєдіяльності, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна. ORCID: 0000-0001-9524-040X. E-mail: alenuvarova@ukr.net.

Гриценко Наталя Валеріївна кандидат економічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2901-1411>. Тел.: +38(050)-582-44-32. E-mail: gritsenkonatal@gmail.com.

Buts Yuriy Vasylovich, Doctor of Technical Sciences, Professor and Head of the Department of Occupational Safety and Environment, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0003-0450-2617. Тел.: +38(050)- 683-08-99. E-mail: buc@kart.edu.ua.

Kahramanyan Artur Oleksandrovych Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management, Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0003-3520-4911. Тел.: +38(050)-630-31-60. E-mail: kartal@kart.edu.ua.

Kozodoy Dmytro Serhiyovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labor and Environmental Protection, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0003-0450-2617. Тел.: +38(050)-066-519-47-31. E-mail: dmitry_1980@ukr.net.

Kraynyuk Olena Volodymyrivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine. E-mail: alenuvarova@ukr.net.

Hrytsenko Natalya Valeriivna Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2901-1411>. Тел.: +38(050)-582-44-32. E-mail: gritsenkonatal@gmail.com.

Статтю прийнято 11.12.2024 р.

УДК 621.331

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ

Д-р техн. наук О. М. Ананьєва, магістр О. В. Червенко

ANALYSIS OF ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY METHODS AND THEIR IMPLEMENTATION ON UKRAINIAN RAILWAYS

Dr. Sc. (Tech.) O. Ananieva, master's O. Chervenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320789>

Анотація. У зв'язку зі зростаючою глобальною увагою до скорочення споживання енергії та викидів вуглекислого газу залізничний транспорт визнано критично важливою сферою для впровадження енергоефективних технологій. Українські залізниці, як важливий компонент національної транспортної системи, стикаються з проблемами, пов'язаними із застарілою інфраструктурою, енергоємними операціями та обмеженою інтеграцією сучасних енергозберігаючих рішень. У статті розглянуто шляхи підвищення енергоефективності та використання енергозберігаючих технологій на залізницях України. Було порушено питання деяких поточних проблем, такі як надмірна залежність від дизельних локомотивів, недостатня електрифікація та використання застарілих технологій, які не є екологічно чистими. Ряд прикладів із Японії, США та Австралії також розширюють практику енергоефективних заходів, включаючи використання гібридних поїздів, систем відновлення енергії та екостанцій. Основна увага дослідження зосереджена на визнанні важливості зміни застарілих структур і використанні сучасних технологій для скорочення викидів парникових газів, зловживання ресурсами та загального підвищення ефективності. Серед обговорюваних заходів – газові електростанції, відновлювані джерела енергії та поїзди на акумуляторних батареях, переваги і рентабельність яких можуть викликати зацікавленість для подальшої реалізації.

Ключові слова: енергоефективність, електрифікація, екологічно чистий транспорт, дизельні локомотиви, гібридні поїзди, відновлювана енергетика, декарбонізація, енергозберігаючі технології, вплив на навколишнє середовище.

Abstract. Due to the growing global focus on reducing energy consumption and carbon dioxide emissions, rail transport has been recognised as a critical area for the introduction of energy efficient technologies. Ukrainian railways, as an important component of the national transport system, face challenges related to outdated infrastructure, energy-intensive operations, and limited integration of modern energy-saving solutions. The article discusses ways to improve energy efficiency and use of energy-saving technologies on Ukrainian railways. Some of the current problems, such as over-reliance on diesel locomotives, insufficient electrification and the use of outdated technologies that are not environmentally friendly, were raised. A number of examples from Japan, the US and Australia are also expanding energy efficiency practices, including the use of hybrid trains, energy recovery systems and eco-stations. The focus of the article is on recognising the importance of changing outdated structures and using modern technologies to reduce greenhouse gas emissions, resource misuse and overall efficiency. Among the measures discussed are gas-fired power plants, renewable energy sources and battery-powered trains, the benefits and cost-effectiveness of which may be of interest for further implementation. The article underscores the importance of integrating

energy efficiency into the strategic development plans for Ukrainian railways. By adopting a holistic approach that combines technological innovation, policy support, and workforce training, the railway sector can achieve significant energy savings and contribute to Ukraine's broader sustainability goals. The findings suggest that these measures not only enhance operational efficiency but also strengthen the competitiveness of Ukrainian railways in the regional and global transportation markets.

Keywords: *Energy efficiency, electrification, clean transport, diesel locomotives, hybrid trains, renewable energy, decarbonization, energy-saving technologies, environmental impact.*

Вступ. Україна, як і багато інших країн, запровадила низку заходів для заохочення практики енергозбереження в залізничному секторі з метою мінімізації високих експлуатаційних витрат і впливу на навколишнє середовище. Залізниці споживають значну кількість енергії через складну мережу різного роду структур і потребу в постійних і безперервних послугах як у сфері перевезень, так і безпосередньому забезпеченні надійної та безпечної експлуатації рухомого складу, систем ЗАТ тощо. Як наслідок, запровадження функцій енергозбереження в залізничній системі може допомогти зменшити залежність від невідновлюваних джерел енергії, а також допомогти їй досягти інших цілей екологічної стійкості. У статті проаналізовані заходи та підходи щодо використання енергозберігаючих технологій на залізницях деяких країн Європи та Азії. Дослідження сфокусовано на тому, як інновації, пов'язані з енергетикою, технології, що включають відновлювані ресурси, і розробки в цифровому секторі можуть сприяти трансформації української залізничної системи, а також зробити її більш надійною, економічно ефективною і стійкою.

Постановка проблеми. Енергоефективність і сталість залишаються гострими проблемами для українських залізниць, які є невід'ємною складовою національної транспортної інфраструктури. Високе споживання енергії в поєднанні зі збільшенням операційних витрат і залежністю від традиційних джерел призводить до економічної та екологічної перспективи, яка може стати на заваді

довгостроковій життєздатності та конкурентоспроможності залізничного сектору. Без цілеспрямованих зусиль з енергозбереження залізниці ризикують збільшити свою енергетичну залежність і вплив на навколишнє середовище всупереч глобальним кліматичним цілям і зобов'язанням країни щодо сталого розвитку. У статті розглянуто нагальну потребу в переході на більш сучасні рішення з енергоефективності, які б допомогли зменшити споживання енергії, скоротити викиди і дати змогу створити більш перспективну систему постачання електроенергії до різних ланок залізниці.

Аналіз досліджень і публікацій. Питання енергозбереження та енергоефективності дійсно є актуальним і пріоритетним завданням для залізничної інфраструктури. У статті [1] автори проаналізували споживання різного роду палива залізницею в різні періоди, починаючи з 1991 року, відносно об'ємів вантажних і пасажирських перевезень, а також виконали аналітичні дослідження щодо державних програм про енергозбереження. Автори статті [2] проаналізували питання енергозбереження на рухомому складі в метрополітені. За ухваленими рішеннями у процесі аналізу можна зробити висновок, що методи підвищення енергоефективності локомотивів, такі як впровадження систем рекуперації, накопичення енергії та інші, де-факто є вирішальними пунктами забезпечення зменшення споживання електроенергії та інших видів палива на тягу поїздів.

Мета. Метою дослідження є аналіз сучасних способів і методів досягнення

кращих показників енергозбереження та енергоефективності серед різних елементів структури залізниці у країнах Європи та Азії і доведення доцільності їх впровадження в залізничну систему України.

Викладення основного матеріалу дослідження. Українська залізнична система є однією з найбільших у Європі, довжина якої складає більше 22 тис. км, із яких 10 тис. є електрифікованими, – майже 48 % загального значення всіх шляхів сполучень [3, 4]. Більша частина залізничних ліній залишається без електрифікації, що призводить до значного використання тепловозів і дизель-поїздів. За

рік «Укрзалізниця» споживає близько 440 тис. т дизельного пального (у т. ч. на тягу 370 тис. т), щодобово на екіпірування близько 840 тепловозів витрачають 1200-1250 т (у т. ч. 1130 т на тягу поїздів) [5].

Як можна побачити зі статистики «Укрзалізниці» [3] щодо кількості наявних одиниць локомотивів у парку (рис. 1), тенденція впровадження саме рухомих одиниць, джерелом енергії яких є електроенергія, має не дуже виражений характер розвитку – тепловози на дизельному пальному досі залишаються серед лідерів.

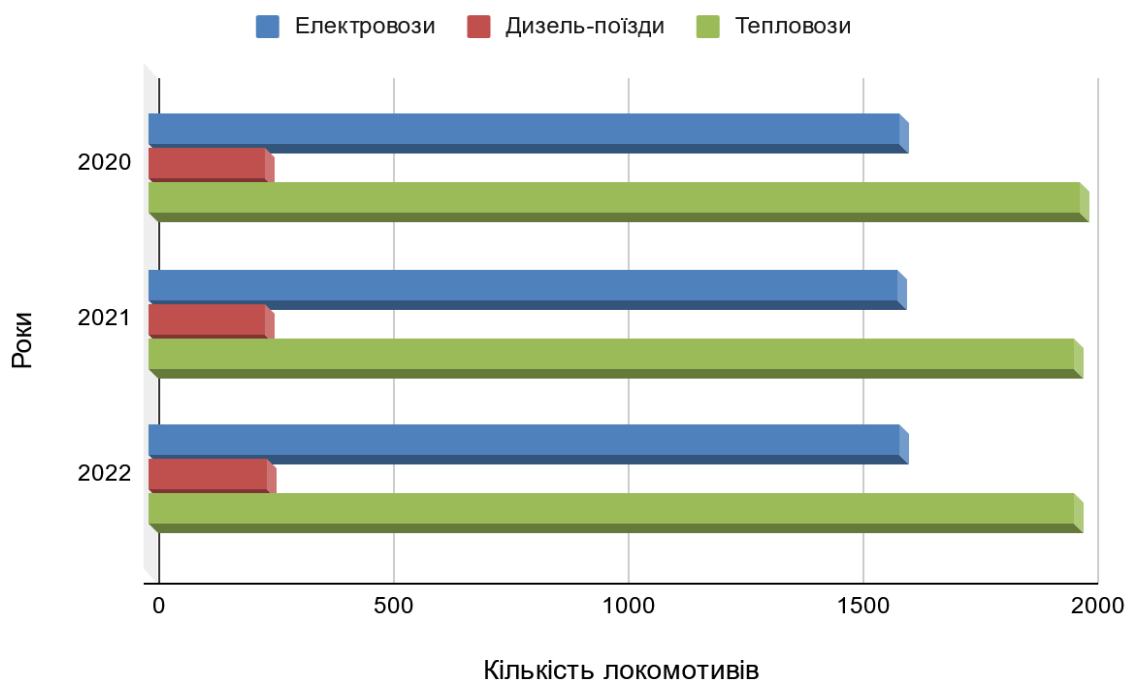


Рис. 1. Порівняння кількості локомотивів від їхнього виду в парках АТ «Укрзалізниця»

Тепловози були винайдені як заміна застарілим локомотивам на паровій тязі, ККД яких приблизно дорівнював 5-10 %, що є дуже малим показником. Із впровадженням тепловозів, двигуни яких переважно працюють на дизельному пальному, цей показник вдалося підвищити в чотири-п'ять разів. Конструкція дизельного двигуна є відносно простою, а можливість локомотива рухатися за будь-

яких навколишніх умов робить його універсальною і в той час важливою одиницею в галузі організації перевезень на залізниці. Водночас електропоїзди потребують безперервного джерела живлення у вигляді повітряної контактної мережі. Також слід зазначити, що затрати на прокладання такої лінії довжиною 5 км еквівалентно вартості нового тепловоза.

Проте тепловози мають один серйозний недолік за впливом на навколишнє середовище – це викид відпрацьованих газів в атмосферу. Ця проблема дійсно є актуальною, по-перше, через інтенсивну експлуатацію саме через їхню універсальність; по-друге, більшість тепловозів і схожі на них машини не мають у своєму складі так званих каталізаторів, тобто відсутня можливість фільтрації або переробки цих газів.

Для зменшення їхньої кількості необхідно зменшити подавання пального у двигун – провести оптимізацію пропускну системи. Як приклад, тепловоз ТЕ10 має дуже великий показник витрат пального, майже 50 % якого відправляється назовні. Тому постало питання про зменшення такого впливу шляхом запровадження спеціальних заходів і технологій, що дають змогу скоротити викиди вуглекислого газу та інших шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Декарбонізація – це процес зменшення викидів вуглекислого газу (CO_2) в атмосферу, який є основним фактором зміни клімату. Витрати пального (зокрема викопного палива – нафта, газ, вугілля) безпосередньо впливають на рівень викидів CO_2 . Якщо систему витрат пального використовують для моніторингу, оптимізації та зменшення витрат (наприклад через ефективніші технології чи стратегії управління), це може сприяти декарбонізації, оскільки зменшення витрат пального зазвичай означає й зменшення викидів парникових газів.

З плином часу було розроблено та впроваджено декілька таких систем, що здатні здійснювати контроль за витратами дизельного пального, аналізувати ефективність його використання та ін. Однією з таких є «БІС-Р» – це мікропроцесорна система контролю витрат пального тепловозів. Програмне забезпечення системи дає змогу отримати візуальний звіт про витрати пального та проаналізувати роботу тепловоза, а також накопичувати і

архівувати всі дані, отримані системою. Приклади даних і звітів показані на рис. 2.

Робота системи заснована на безперервному контролі витрат пального відповідно до вимірної потужності, що розвиває дизель-генераторна тягова установка. Станом на 2011 рік встановлено 929 систем «БІС-Р» у серії тепловозів ЧМЕЗ [3].

Також можна виділити ще одну систему контролю показників роботи тепловоза (СКПРТ) – «Дельта-СУ». Її функційні можливості ефективного використання пального включають:

- динаміку фактичної кількості пального в баку тепловоза;

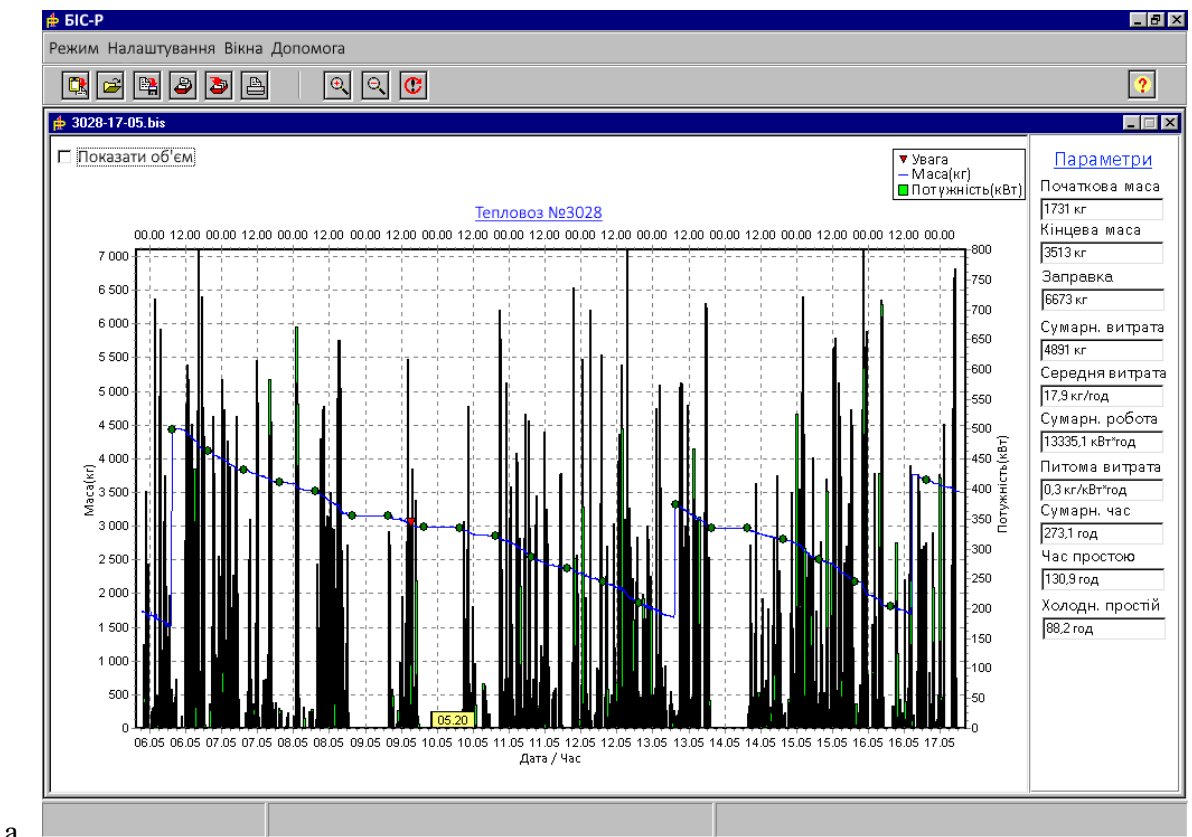
- визначення фактичних витрат дизельного пального та порівняння їх із розрахунковими [7];

- автоматизацію передавання залишків пального в баку між змінами локомотивних бригад, виключивши в обліку витрат пального «людський» фактор та унеможлививши нецільове використання пального на локомотиві;

- перегляд чинних норм і розроблення коректної системи нормування витрат пального маневровими тепловозами з урахуванням виконаної роботи, режимів роботи протягом зміни та реального технічного стану конкретних локомотивів.

Отже, використання таких систем може бути частиною декарбонізаційних заходів, якщо їх інтегрувати в більш широкі стратегії скорочення викидів парникових газів.

Ще одним методом збереження енергії, винайденим паралельно з впровадженням електрифікованого транспорту, є використання ефекту рекуперації – процесу відновлення енергії, яка у звичайних умовах втрачається, і її повторне використання. Основний принцип рекуперації полягає в перетворенні надлишкової енергії, що виділяється в ході роботи систем, у корисну форму, яка може бути використана повторно. На транспорті, у тому числі і залізничному, цей метод частіше за все використовують у гальмівних системах.



а

АСУ БІС-Р

е: тепловоз №3028 18.04.06 15:15

Дата	Зміна	Небезпеці	Час роботи (год)	Маневри (год)	Простій (год)		Отримано (кг)	Здано (кг)	Заправка (кг)	Витрата (кг)	Середній (кг/год)	Робота (кВт*год)	Примітки
					Загальний	Холодн.							
06.05.06	07:30-19:30		12,0	6,9	5,1	2,6	4425	4107	0	318	26,5	1113	
06.05.06	19:30-07:30		12,0	8,4	3,6	1,5	4107	3836	0	271	22,5	698	
07.05.06	07:30-19:30		12,0	6,0	6,0	2,8	3836	3654	0	182	15,1	410	
07.05.06	19:30-07:30		12,0	3,2	8,8	4,8	3654	3513	0	141	11,8	313	
08.05.06	07:30-19:30		12,0	8,3	3,7	1,7	3513	3151	0	362	30,1	1132	
08.05.06	19:30-07:30		12,0	0,1	11,9	11,9	3151	3151	0	1	0,1	0	
09.05.06	07:30-19:30		12,0	6,2	5,8	3,3	3155	2980	0	174	14,5	350	
09.05.06	19:30-07:30		12,0	0,1	11,9	11,0	2980	2975	0	5	0,4	0	
10.05.06	07:30-19:30		12,0	4,5	7,5	6,4	2977	2858	0	118	9,9	306	
10.05.06	19:30-07:30		12,0	9,1	2,9	0,6	2858	2539	0	319	26,5	988	
11.05.06	07:30-19:30		12,0	6,6	5,4	4,7	2547	2376	0	171	14,2	420	
11.05.06	19:30-07:30		12,0	6,8	5,2	3,6	2376	2173	0	204	16,9	462	
12.05.06	07:30-19:30		12,0	9,6	2,4	0,7	2173	1864	0	309	25,7	839	
12.05.06	19:30-07:30		12,0	8,6	3,4	1,6	1864	3318	1670	216	18,0	445	
13.05.06	07:30-19:30		12,0	9,1	2,9	1,1	3318	2962	0	356	29,6	1196	
13.05.06	19:30-07:30		12,0	0,1	11,9	11,9	2962	2963	0	0	0,0	0	
14.05.06	07:30-19:30		12,0	8,3	3,7	1,8	2964	2801	0	163	13,6	359	
14.05.06	19:30-07:30		12,0	9,2	2,8	1,3	2801	2510	0	291	24,2	919	
15.05.06	07:30-19:30		12,0	7,9	4,1	2,1	2509	2179	0	330	27,5	998	
15.05.06	19:30-07:30		12,0	5,0	7,0	3,0	2178	1806	0	372	30,9	1025	
16.05.06	07:30-19:30		12,0	7,6	4,4	2,4	1807	3678	2065	194	16,1	434	
16.05.06	19:30-07:30		11,0	5,2	5,8	3,3	3678	3513	0	165	14,9	380	
УСЬОГО	Дата	Час роботи (год)	Маневри (год)	Простій (год)		Отримано (кг)	Здано (кг)	Заправка (кг)	Витрата (кг)	Середній (кг/год)	Робота (кВт*год)	Примітки	
	Початк.	Кінець.			Загальний	Холодн.							
	06.05.06	16.05.06	263	137	126	84			3735	4662	17,7	12787	

Стр. 1/1

б

Рис. 2. Інтерфейс АСУ «БІС-Р»: а – діаграма; б – таблиця

Рекуперация енергії під час гальмування означає, що замість того, щоб перетворювати кінетичну енергію рухомого транспорту в теплоту (що є характерним для традиційних гальм), цю енергію перетворюють в електричну і передають назад у мережу або використовують для живлення самого транспортного засобу.

Прикладом є локомотив під час скочування з гірки, електродвигуни якого починають працювати в режимі генератора, вироблюючи електроенергію, що передається через контактну мережу або іншим локомотивам (рис. 3), або в загальну енергосистему через тягові підстанції.

Це знижує потребу в додатковій енергії, зменшує витрати пального, а також зменшує рівень викидів вуглекислого газу.

Україна займає 14 місце у світі за кількістю електрифікованих ліній на залізницях. З початку років незалежності

для зменшення залежності від невідновлюваних джерел енергії почали розробляти різні програми розвитку залізниць з переходу на тягу постійного або змінного струму. Так, у 1993 році була затверджена програма електрифікації на найближчі 10 років (1994-2004). Проект передбачав переведення на електротягу більше 2000 км. Результати виконання за окремими філіями показані на рис. 4.

У 2005 році був затверджений аналогічний проект на 2005-2008 роки. Із запланованих 875 км загальної довжини електрифікованих ліній вдалося здійснити тільки 303 км.

Наприкінці 2007 року впроваджують нову програму електрифікації на 2008-2020 роки. У планах було електрифікувати більше 2,2 тис. км залізниць. Але у 2015 році були внесені деякі корективи у вигляді зменшення цього показника до 838 км [6].

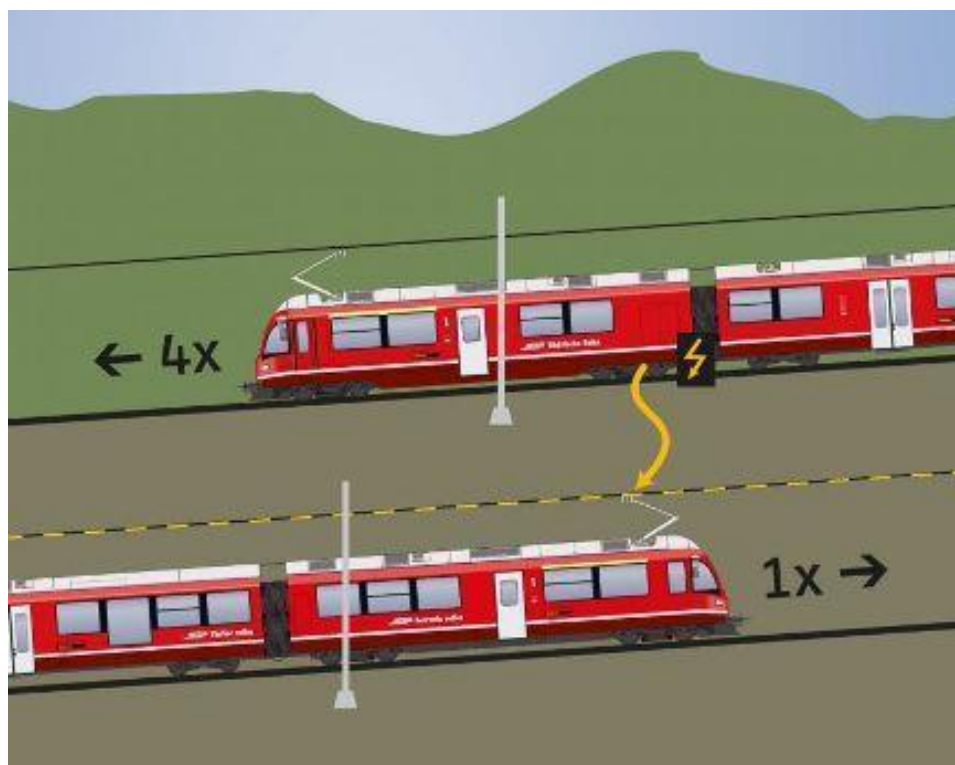


Рис. 3. Принцип передавання електроенергії від одного електропоїзда до іншого методом рекуперативного гальмування

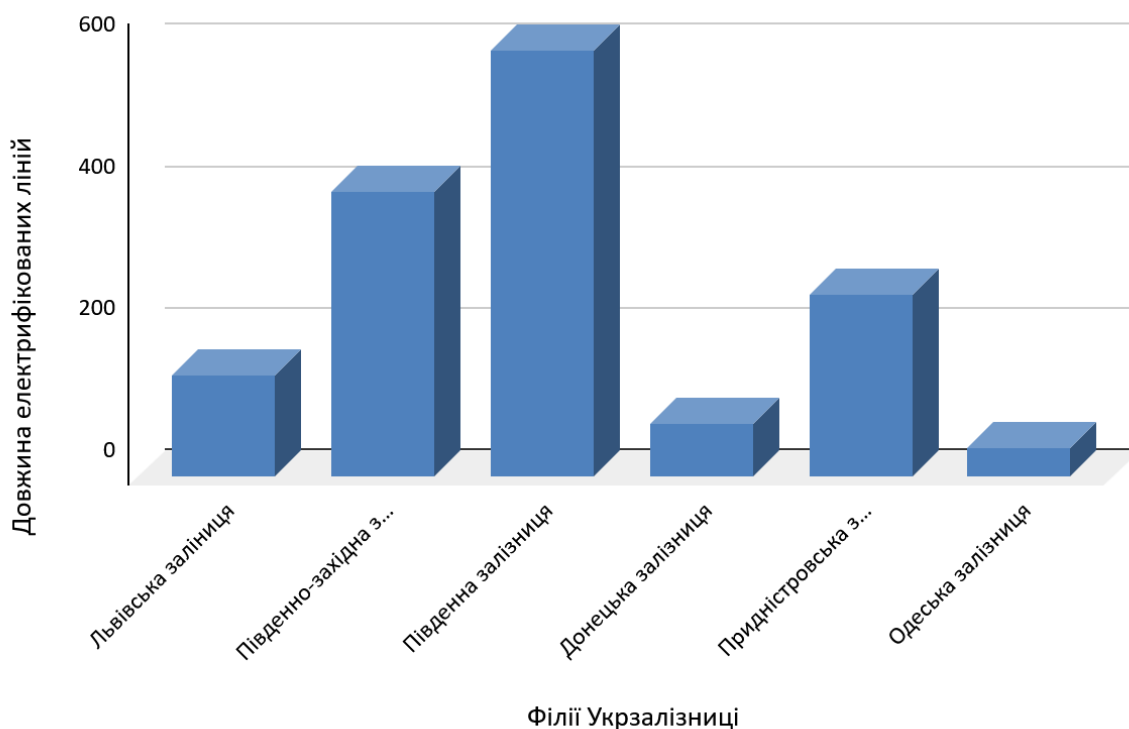


Рис. 4. Довжини залізничних ліній, що були електрифіковані в період 1994-2004 років

Серед проєктів зі створення більш екологічного джерела електроенергії, ніж що є зараз, АТ «Укрзалізниця» оголосила про плани створення газових електростанцій потужністю 250 МВт за теперішнього споживання 300 МВт. Така станція могла б частково забезпечити потреби залізничної критичної інфраструктури та споживачів в Україні [8]. Слід зазначити, що такі станції мають удвічі більший ККД, ніж теплові електростанції, але все ж таки поступаються АЕС із показником 80 %. Єдина проблема атомних станцій – це наявність у своєму складі радіоактивних елементів і матеріалів, що з порушенням нормальної роботи компонентів може призвести до їх викиду в навколишнє середовище.

Щодо рішень у таких країнах, як Сполучені Штати Америки та країни Азії, то там використовують більш широкий підхід до вирішення цієї проблеми у сфері

співіснування залізниць і природи. У Японії на залізницях JR East було впроваджено 10 екостанцій. У 2018 році завдяки сонячним і вітровим електростанціям було вироблено та спожито на станціях і депо більше 2 ГВт електроенергії, сумарно виробляючи 18,4 ГВт на рік. У межах станції було здійснено заміну всіх освітлювальних пристроїв на світлодіодні, оптимізовано систему вентиляції та кондиціонування повітря в підземних секціях станцій Токіо та Уено, що допомогло скоротити споживання енергії на 1,15 ГВт. Використання датчиків руху та інтелектуальних систем управління для автоматичного ввімкнення освітлення та кондиціонування також є дієвим рішенням щодо збереження енергії – відповідні елементи системи активні лише тоді, коли є необхідність. Приклад концепту екостанції Йоцуя (Токіо) зображений на рис. 5.

Ще більш цікавою концепцією є поїзди з бортовим джерелом живлення – акумуляторною батареєю. Такі поїзди зменшують викиди вуглецю в атмосферу та рівень шуму, знижують витрати на технічне обслуговування і забезпечують гнучкість електрифікації, мінімізуючи різного виду перешкоди під час модернізації. Будучи модифікованою технологією з потенціалом для початку з малого та масштабування пізніше, це очевидний екологічний вибір для декарбонізації.

Однією з компаній, що займається розробленням і створенням таких тягових рухомих одиниць, є Hitachi Rail. Вони впроваджують гібридні, напівдизельні або «full-battery» поїзди різних категорій – від трамваїв до поїздів міжрегіонального призначення, Intercity та ін.

Перший варіант забезпечує покращену продуктивність у всьому автопарку – нижчий викид CO₂, зниження споживання палива до 50 %, скорочений час у дорозі та збільшений запас ходу завдяки гнучкій масштабованій ємності акумулятора. Ці потяги з батарейним живленням, здатні рухатися як на електрифікованих, так і неелектрифікованих залізничних лініях, пропонують більшу гнучкість для управління парком на регіональних лініях, практично не впливаючи на залізничну інфраструктуру [11].

Другий вид – застосування технології «full-battery», тобто живлення відбувається тільки через внутрішню батарею. Такі поїзди на акумуляторних батареях можуть долати 70 км на неелектрифікованих лініях, працюючи на міжміських швидкостях із тією самою або збільшеною продуктивністю. Підзарядження батареї здійснюється за рахунок контактної мережі, або за її відсутності – через рекуперативне гальмування. Вони експлуатовані вже в деяких країнах Європи – Великобританії та Італії.

В Австралії знаходиться одна з найбільш протяжних та енергоємних залізничних мереж. Декарбонізація цього сектору – складний процес з огляду на жаркий клімат і великі відстані між станціями. Дизельні локомотиви, як і в багатьох країнах світу, залишаються основою, але перехід до нових технологій декарбонізації є перспективним напрямом зниження викидів парникових газів.

Дослідження Університету Квінсленду та Aurizon [12] сфокусовані на створенні локомотивів, здатних перевозити великий об'єм вантажу на значні відстані (рис. 6). Проблеми включають значну вагу батарей і потребу в ефективній системі охолодження. Одним із рішень є використання рекуперативного гальмування, яке дає змогу повертати частину енергії назад у систему, знижуючи загальні витрати енергії.

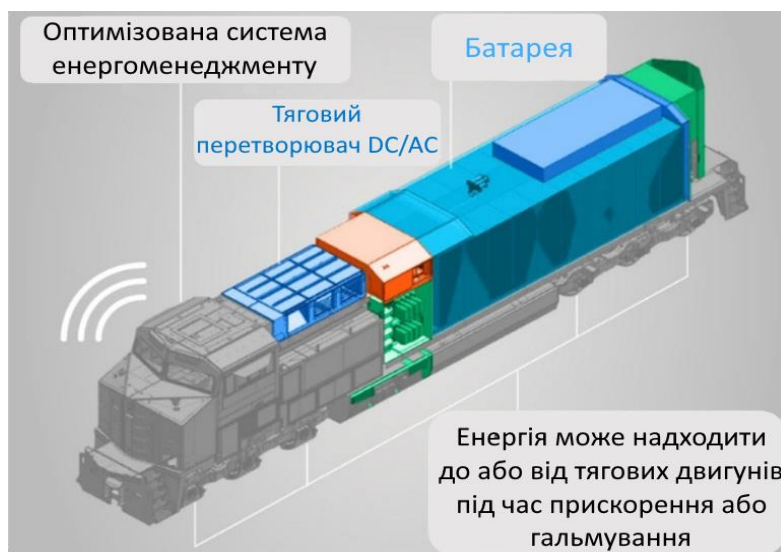


Рис. 6. Структура електричного акумуляторного локомотива (модифікований BNSF)

Що стосується охолодження, то існує проблема, яка дуже сильно впливає на нормальну роботу акумуляторної батареї, – це температура навколишнього середовища: у випадку занадто низького значення ККД батареї стрімко зменшується, тобто погіршується здатність віддавати енергію. Під час спеки відбувається її нагрів, що зменшує термін служби, а в екстремальних умовах може призвести до пожежі.

Це завдання виявляється дедалі складнішим, оскільки для живлення такого роду машин необхідна велика кількість електроенергії, результатом чого є великий об'єм акумулятора. Залежно від положення центральні батареї мають тенденцію до більш швидкого деградування, ніж ті, що розташовані зовні. Крім того, на загальну вагу та об'єм батарейного відсіку також суттєво впливає включення систем охолод-

ження, що у кінцевому результаті складає приблизно 10 т. Такі системи теж створюють додаткові витрати електроенергії – 10-20 % загальної кількості споживаної енергії локомотива, що за суворих умов експлуатації може призвести до збиткових, а іноді й катастрофічних наслідків.

Оптимальні параметри батареї визначені конструкцією та її хімічними властивостями. Так, більшість виробників автомобілів використовують акумуляторні елементи з хімічним складом NMC (LiNiCoMnO_2). Компанія Tesla розробила власну унікальну хімію, відому як NCA (LiNiCoAlO_2). Для підвищення безпеки та довшого терміну служби виробники елементів впроваджують структуру LFP (LiFePO_4) або LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$). [12] Їхні порівняльні характеристики подані у вигляді діаграми на рис. 7.

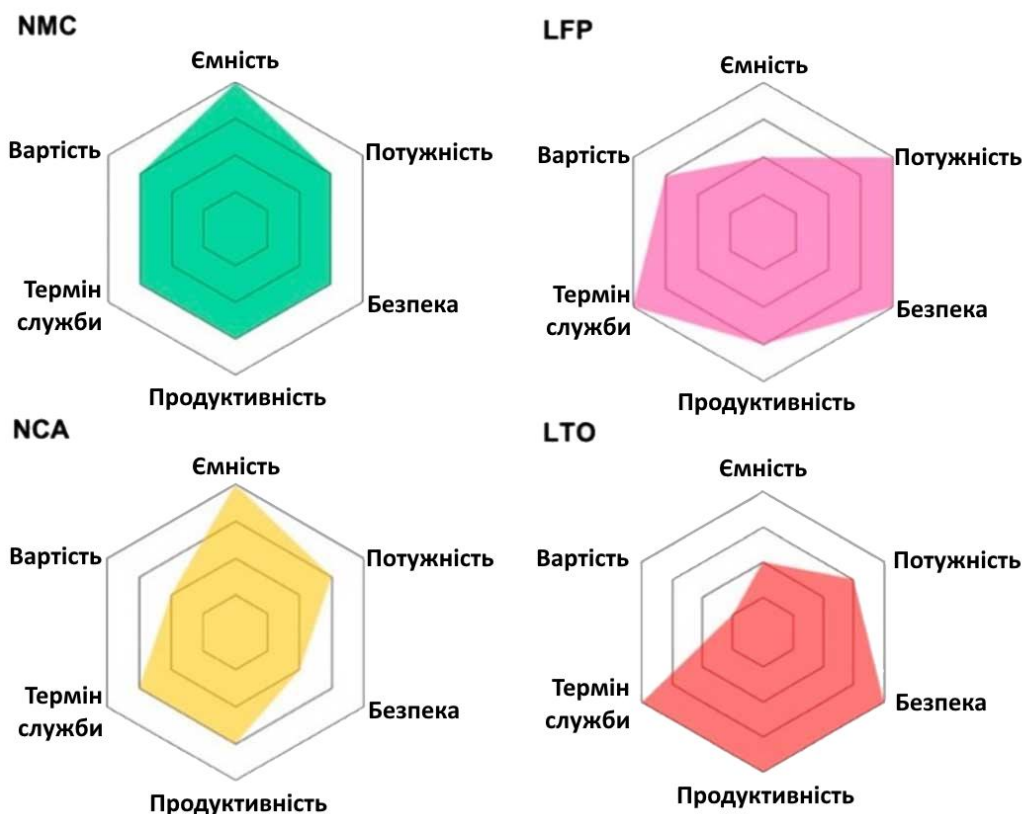


Рис. 7. Порівняння акумуляторних батарей із різною хімічною структурою за основними якісними та кількісними показниками

Висновки. Упровадження розглянутих методів використання енергії на залізницях України щодо модернізації або створення нових об'єктів (станцій, локомотивів тощо) дає великі можливості заощадити природні та економічні ресурси. Звісно, існує проблема залучення інвестиційних коштів для реалізації

подібних проєктів – великі початкові вкладення. Однак, досягши їх впровадження в різні елементи залізничної системи, це дасть змогу в десятки, а то і сотні разів скоротити витрати невідновлюваних джерел енергії, замінивши їх більш гнучкими та екологічними аналогами.

Список використаних джерел

1. Малишко І. В., Малишко Л. І., Пилипенко Л. В., Романко В. І. Споживання електроенергії та енергозбереження на залізничному транспорті України. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2006. № 12. С. 245-248. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2006/18880> (дата звернення: 16.11.2024).
2. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену / А. В. Донченко, А. О. Сулим, О. С. Сіора та ін. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2016. № 3(63). С. 108-119. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74732> (дата звернення: 16.11.2024).
3. Залізничний транспорт. Міністерство розвитку громад та територій. URL: <https://mtu.gov.ua/timeline/Zaliznichniy-transport.html> (дата звернення: 16.11.2024).
4. Залізничний транспорт України. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Залізничний_транспорт_України (дата звернення: 16.11.2024).
5. У 2011 році Укрзалізниця заощадила понад 2,7 тис. тон дизельного пального: прес-центр «Укрзалізниця». URL: https://www.uz.gov.ua/press_center/latest_news/archive/main_2011/page-46/306346/ (дата звернення: 16.11.2024).
6. Електрифікація залізниць України за роки незалежності. СПП «КВАЗАР». URL: <https://kvazar.com.ua/uk/novosti-ua/225-elektrifikatsiya-zaliznitsi-nezalezhoji-ukrajini> (дата звернення: 16.11.2024).
7. Тези доповідей за матеріалами восьмої науково-практичної міжнародної конференції «Проблеми міжнародних транспортних коридорів та єдиної транспортної системи України». *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2012. № 38. С. 1-148. URL: <https://ideas.repec.org/a/scn/031720/15103863.html> (дата звернення: 16.11.2024).
8. «Укрзалізниця» планує будівництво газової генерації потужністю 250 МВт». *Forbes*. 2024. URL: <https://forbes.ua/news/ukrzaliznitsya-planue-pobuduvati-elektrogeneratsii-na-250-mvt-06062024-21616> (дата звернення: 16.11.2024).
9. How can we achieve an energy efficient railway? ARUP. URL: <https://www.arup.com/insights/how-can-we-achieve-an-energy-efficient-railway/> (дата звернення: 18.11.2024).
10. UP Crossing into a Lower-Carbon Future. Chevron Renewable Energy Group. URL: <https://www.regi.com/resources/case-studies/crossing-into-a-lower-carbon-future-1> (дата звернення: 18.11.2024).
11. Battery Powered Trains. Hitachi Rail. URL: <https://www.hitachirail.com/products-and-solutions/battery-powered-trains/> (дата звернення: 18.11.2024).

12. Decarbonising Australian railway fleets with batteries. The University of Queensland.
URL: <https://mechmining.uq.edu.au/article/2022/02/decarbonising-australian-railway-fleets-batteries> (дата звернення: 20.11.2024).

Ананьєва Ольга Михайлівна, доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.
E-mail: ananeva@kart.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>.

Червенко Олександр Володимирович, магістр кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.
E-mail: aleksandr.4ervenko@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7936-8282>.

Ananieva Olha, Dr. Sc (Tech.), Professor of the Department of Automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ananeva@kart.edu.ua.
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>.

Chervenko Oleksandr, master's of Department of Automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: aleksandr.4ervenko@gmail.com.
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7936-8282>.

Статтю прийнято 12.12.2024 р.

УДК 621.331

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Д-р техн. наук О. М. Ананьєва, магістри С. О. Довгаль, Є. С. Терехов

EFFICIENCY OF HEAT PUMPS USE ON RAILWAY TRANSPORT

Dr. Sc. (Tech.) O. Ananieva, master's S. Dovhal, master's Ye. Terekhov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320832>

***Анотація.** У статті розглянуто історію винаходу теплових насосів, фізичні процеси, що відбуваються при функціонуванні теплового насоса. Було порушено питання ефективності використання теплової енергії для опалення приміщень, підігріву технічної води у холодний період року та кондиціонування в теплий. Основну увагу зосереджено на ефективності використання сучасного обладнання, зокрема систем, що побудовані на основі теплового насоса, і необхідності переоснащення рухомого складу та будівель, які знаходяться в підпорядкуванні АТ «Укрзалізниця». Також проведено розрахунок витрат у разі використання застарілого електричного та котельного обладнання і з упровадженням систем, побудованих на основі теплового насоса. Розглянуто приклад ефективного використання теплового насоса на станції в Харківській області.*

***Ключові слова:** енергоефективність, економія, коефіцієнт COP, Coefficient of Performance, енергозберігаючі технології, тепловий насос, альтернативні джерела енергії.*

***Abstract.** The article reviews the history of invention of heat pumps, as well as the physical processes occurring during their operation. The main attention is paid to the efficiency of thermal*

energy utilization for space heating, heating of process water in the cold season and air conditioning in the warm season. In particular, the article considers modern systems based on heat pumps and the need to modernize rolling stock and buildings subordinated to *Ukrzaliznytsia*.

Heat pumps are devices that allow the efficient transfer of heat from the environment (air, water or ground) into a room, which makes them highly demanded for heating and air conditioning. The benefits of heat pumps are obvious, as they can significantly reduce energy consumption compared to traditional heating methods such as gas boilers or electric heaters. In contrast, a heat pump can utilize the environment as a source of energy, converting it into heat with high efficiency. Heat pumps can significantly reduce running costs as their coefficient of energy conversion (COP) can exceed 4, meaning that it takes less energy to generate one kilowatt of heat from a heat pump than a traditional electric heater or boiler. Thus, switching to such systems is cost-effective and allows for a more stable and efficient supply of heat and hot water in buildings and facilities.

In addition, the article addresses the important issue of how the use of outdated electrical and boiler equipment incurs significant maintenance and operating costs and negatively affects energy efficiency. Unlike traditional systems, heat pumps can significantly reduce these costs by providing a higher degree of energy conversion and minimizing energy use losses.

Thus, the transition to modern systems based on heat pumps not only helps to reduce energy costs, but also meets environmental requirements by reducing emissions of carbon dioxide and other pollutants.

Keywords: energy efficiency, savings, COP, Coefficient of Performance, energy saving technologies, heat pump, alternative energy sources.

Вступ. На сучасному етапі розвитку залізничного транспорту виникла необхідність покращення ефективності систем автоматизації. Надійні та захищені релейні системи автоматизації відходять на задній план, поступаються новітнім і швидкісним мікропроцесорним системам. Однак такі системи потребують більш якісної підготовки середовища, включаючи приміщення для їх розташування, методи розміщення кабелів, заводозахисеність тощо.

Великий вплив на функціонування мікропроцесорних систем централізації, особливо в холодний період року, має температурний режим їх використання. Забезпечити нормальний температурний режим стає дедалі важче, особливо у воєнний час:

- енергоносії дорожчають;
- відбувається помітний дефіцит енергоносіїв.

Економія в опаленні приміщень, рухомого складу, підігріві води стає все більш актуальною. Використання альтернативних

джерел енергії, у тому числі і теплових насосів, може змінити ситуацію на краще.

Постановка проблеми. Оптимізація витрат і енергоефективність продовжують бути важливими питаннями функціонування залізниць України. Споживання електричної енергії займає високе місце в рангу витрат, а використання застарілого обладнання ще більше загострює це питання. Без залучення новітніх та енергоефективних технологій неможливий розвиток будь-якого підприємства. Не є виключенням і АТ «Укрзалізниця». Саме залучення альтернативних джерел енергії та відновлювальних джерел енергії може допомогти залізниці вийти на самоокупність і енергонезалежність. Існує глобальна необхідність переоснащення існуючих активів і створення нових із використанням енергозберігаючих технологій, оскільки залізничний транспорт є ключовим для економіки держави, особливо у воєнний період.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні підприємства працюють в умовах серйозного дефіциту

енергоресурсів. Кожне підприємство, метою якого є стабільне функціонування та конкурентоспроможність, прагне розробити енергетичну стратегію для системного підходу у використанні енергоресурсів.

Енергетична політика – це напрям діяльності підприємства, пов'язаний з її енергетичним функціонуванням. Це документ, який офіційно затверджено керівництвом підприємства. Завдяки енергетичній політиці закладають основу для заходів, які мають бути здійснені для досягнення енергетичних цілей та енергетичних завдань розвитку [8]. У результаті якісного енергоменеджменту відбувається оптимізація витрат на енергоносії на підприємстві. Важливим інструментом енергоменеджменту є використання систем альтернативної енергетики, таких як сонячні батареї, теплові насоси, сонячні колектори тощо.

Основними перевагами теплових насосів є їхні економічність, екологічність, універсальність (можливість використання як для опалення, так і кондиціонування повітря), а також безпечність [2]. Теплові насоси застосовуювані в різних сферах, таких як промисловість, житлові та громадські будівлі. Щороку кількість теплових насосів збільшується приблизно на 1 млн од. Зростаюча популярність цього екологічного джерела енергії сприяла появі великої

кількості літератури, що охоплює загальний опис принципу роботи і конструкції теплових насосів і детальні розрахунки для вибору їхньої потужності для різних об'єктів теплопостачання [4-7]. Однією з важливих характеристик теплових насосів є коефіцієнт потужності, який залежить від температури зовнішнього джерела тепла і температури, на яку налаштована система опалення. Однак досліджень, які аналізують ці залежності, у сучасній науковій літературі досить мало.

Мета. Метою роботи є аналіз ефективності використання теплових насосів і систем, створених на їхній основі, у функціонуванні підприємств залізниці України.

Викладення основного матеріалу дослідження. Історія теплових насосів сягає сивої давнини. Цей період набагато довший, ніж прийнято вважати. Перші передумови були закладені ще 200 років тому. Спочатку це були теплові машини, які заклали основу виробництва холодильного обладнання та послужили прототипами сучасних теплових насосів.

Парову машину людство використовувало протягом багатьох десятиліть. І це з часом стало основою для винаходу перетворень енергії з одного виду на інший. Механічну енергію стали перетворювати на електричну.

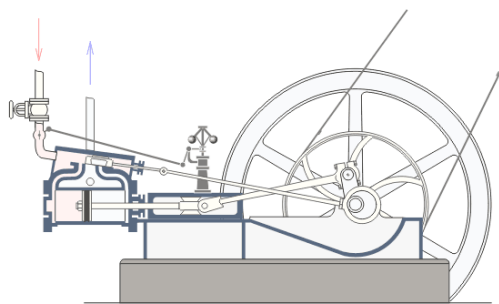


Рис. 1. Схема роботи парової машини подвійної дії [9]

Перша установка, яка могла не тільки виділяти тепло, а і поглинати його, була винайдена в 1835 році американцем Якобом Перкінсем [10]. Він створив і запатентував першу холодильну установку. Установка складалася з компресора, обладнання для поглинання тепла і випромінювання тепла. Такі самі елементи присутні в сучасних холодильних установках і теплових насосах.

Ще в 1852 році Уільямом Томсоном Кельвіном [10] було висунуто ідею, що теплові машини можна буде використовувати для обігріву житла. Але поширення теплових насосів відбулося лише через сто років. Справжній бум їх використання відбувся в 70-ті роки минулого століття в Німеччині. Сталося це внаслідок паливної кризи. Але вже у 1980-х роках кількість використовуваних теплових насосів стала знижуватися.

В Україні використання теплових насосів тільки зараз набуває своєї популярності. На це впливає і зростання цін на енергоносії, і постійні зміни в політичній сфері. Великою перешкодою у процесі популяризації використання альтернативних джерел енергії стала, звісно, агресія росії проти України.

Фізичні процеси, які протікають у теплових насосах. Тепло є однією з внутрішніх енергій матерії. Якщо під дією певних факторів з'являється можливість передати цю енергію якомусь іншому матеріалу (об'єкту), то фазовий перехід відбувається до об'єкта з більш низькою температурою. Коли якийсь нагрітий предмет буде остигати на відкритому просторі, то його температура буде знижуватися до температури навколишнього середовища. Теплові насоси використовують у своїй роботі дещо інший процес. Так, з дією відносно предмета зовнішньої сили температура об'єкта перестає змінюватися, і відбувається зміна його стану. Як приклад, ми бачимо такий процес у себе на кухні кожного дня в разі кипіння чайника. Вода за $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ перетворюється на пару (рис. 2).

Принцип дії теплових насосів побудовано на двох фізичних процесах – випарювання та конденсація. З випарюванням насос акумулює низькотемпературне тепло далі передає тепло за конденсації.

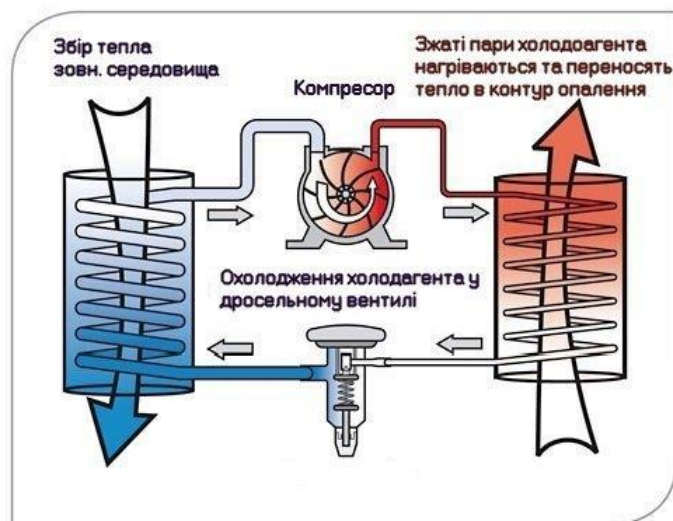


Рис. 2. Схема фізичних процесів, які протікають у тепловому насосі [12]

Ефективність використання теплових насосів. Для розуміння економічного ефекту використання теплових насосів використовують термін «коефіцієнт перетворення електричної енергії в теплову» (COP, Coefficient of Performance). Тобто для передавання тепла від джерела до споживача відбувається прикладення певної зовнішньої сили, у цьому випадку електричної енергії [11].

Типові значення коефіцієнта COP для різних видів теплових насосів:

- повітряні теплові насоси: 2,5-4,0;
- геотермальні, або ґрунтові, теплові насоси: 3,5-5,0;
- водяні теплові насоси: 4,0-6,0.

Залежність коефіцієнта перетворення енергії μ від температури низькопотенційного джерела теплоти $t_{дж}$ і температури теплоносія $t_{нос}$, який був нагрітий у тепловому насосі [1] зображено на рис. 3.

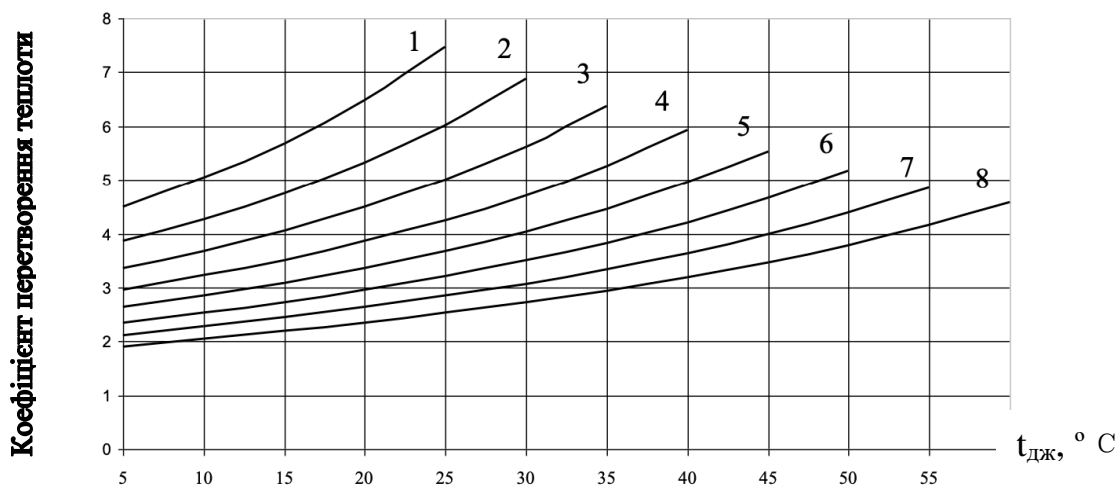


Рис. 3. Залежність коефіцієнта перетворення енергії μ від температури низькопотенційного джерела теплоти $t_{дж}$ і температури теплоносія $t_{нос}$, який був нагрітий у тепловому насосі [1]
Температура теплоносія після теплового насоса [1]:

1 – 35 °C, 2 – 40 °C, 3 – 45 °C, 4 – 50 °C, 5 – 55 °C, 6 – 60 °C, 7 – 65 °C, 8 – 70 °C

Опалення залізничних вагонів. Для отримання тепла в рухомому складі на залізниці використовують такі системи опалення:

- вугільно-водяну;
- комбіновану;
- електричну.

Для перших двох систем опалення використовують воду, яку розігрівають у котлі завдяки спаленню вугілля чи комбінуючи тверде паливо та електроенергію.

Принцип водяного опалення нічим не відрізняється від звичайної системи

опалення в будинках. Вода циркулює по трубах, зведених у єдину систему та прокладених через вагон (рис. 4).

За електричної системи опалення у вагоні відбувається за рахунок електричних пічок. Розташовують їх на підлозі у пасажирських приміщеннях, коридорах і службових відділеннях, туалетах. Також для обігріву використовують калорифери (рис. 5).

Залежно від типу вагона встановлюють від 30 до 52 пічок. Їхня загальна потужність сягає до 26 кВт. Потужність калорифера в разі його використання

складає 22 кВт, тобто загальна потужність, яку споживає електрообладнання для обігріву, складає 48 кВт.

Виходячи з середнього коефіцієнта COP, який ми розглянули раніше, зі

встановленням теплового насоса «повітря-повітря» можна обігрівати салон вагона з витратами електроенергії $48/3 = 16$ кВт, тобто в середньому витрати електроенергії на опалення будуть у три рази менше.

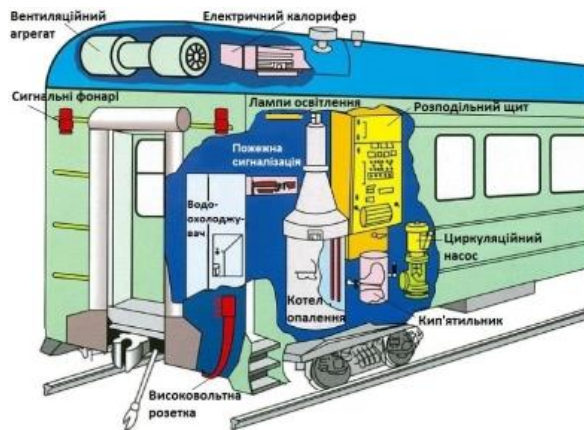


Рис. 4. Внутрішнє електрообладнання пасажирського вагона [14]

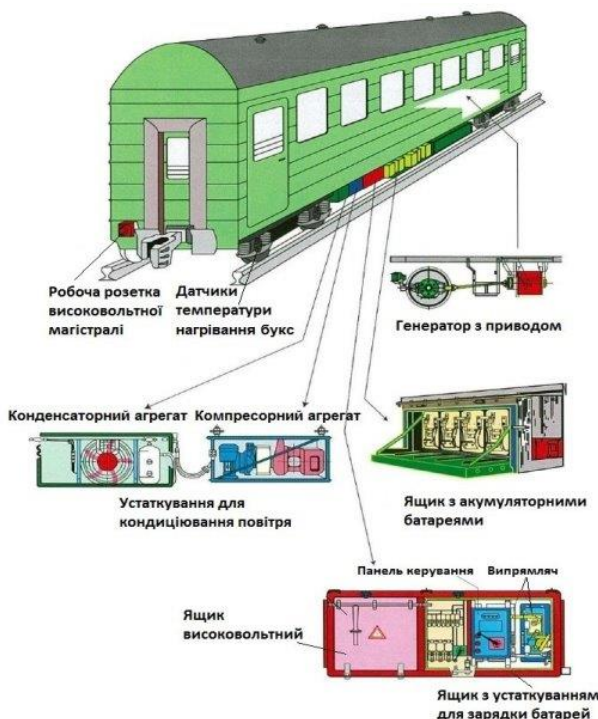


Рис. 5. Зовнішнє електрообладнання пасажирського вагона [14]

Використання теплових насосів для обігріву приміщення станції та підігріву води. Станція Залютине – це вантажно-пасажирська проміжна залізнична станція. Клас станції – 3. Опалення диспетчерського,

господарських приміщень і приміщення вокзалу до втілення змін відбувалося за рахунок двох вугільних котлів. Підігріву води не існувало. Незважаючи на це, витрати вугілля сягали близько 75 т/р. [15].

На станції було проведено енергетичний аудит. За його результатами було ухвалено рішення про встановлення геотермального теплового насоса потужністю 40 кВт та електричного котла потужністю 10 кВт на період опалення в зимовий період. З'явилася можливість користуватися теплою санітарною водою впродовж усього року, а також кондиціонування в теплий період року.

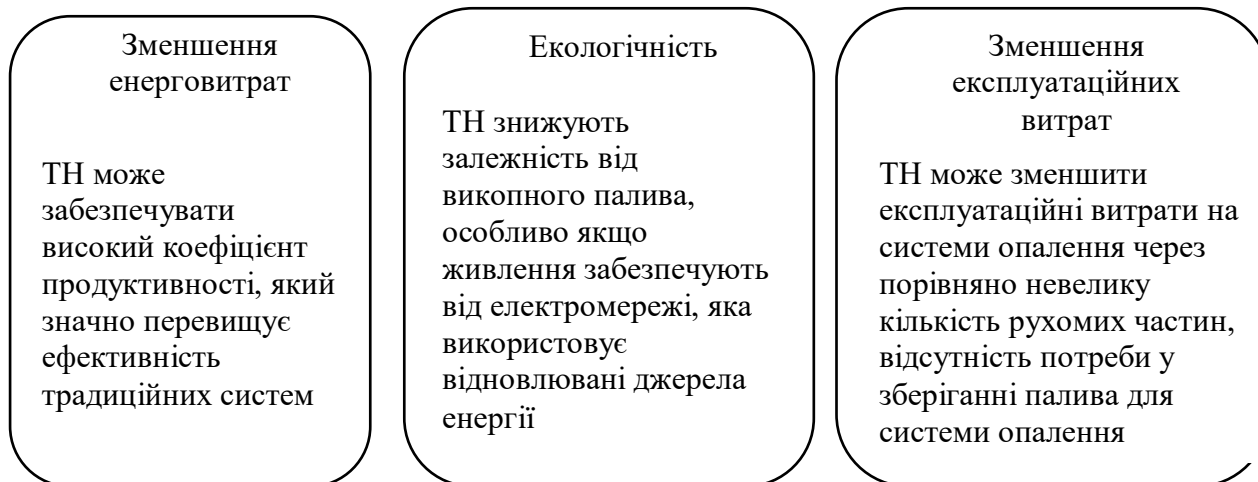
Тепловий насос являє собою основу системи опалення та бере на себе більшу частину теплової потужності. З суттєвим зниженням температури зовнішнього сере-

довища відбувається підключення електричного котла. Завдяки його роботі відбувається підтримання необхідної потужності.

Витрати електроенергії на опалення приміщень взимку та кондиціонування влітку в середньому складають 52 тис. кВт/год за рік. За нинішніх цін на електроенергію для підприємств із 1 січня 2024 року складає 8 600 за 1 мВт електроенергії, тобто $52 * 8\ 600 = 447\ 200$ грн/р. За старої системи опалення з використанням твердопаливних котлів і сучасних мінімальних цін на вугілля витрати склали $6\ 8\ 500 * 75 = 637\ 500$ грн/р.

Висновки

Основні переваги використання теплових насосів на залізниці



Використання теплового насоса в рухомому складі залізниці є перспективним рішенням для підвищення енергоефективності та зменшення викидів парникових газів. Теплові насоси ефективно використовують енергію навколишнього

середовища (наприклад повітря або ґрунту) для обігріву чи охолодження приміщень, що особливо важливо для комфорту пасажирів у вагонах, а також забезпечення температурного режиму в спеціальних технічних відсіках.

Список використаних джерел

1. Дослідження ефективності застосування теплонасосних установок для потреб теплопостачання в умовах України / С. Р. Бікмаєв, М. В. Губинський, А. Ю. Усенко та ін. *Енергетика теплотехнології та енергозбереження. Інтегровані технології та енергозбереження*. 2010. № 4. С. 15-18.
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/NT1513>.

3. Дешко В. І., Шовкалюк М. М., Шевченко О. М., Шовкалюк Ю. В. Аналіз нормативів споживання теплоти в Україні та світі. *Нова тема*. 2018. № 2. С. 6-10.
4. Дешко О. В., Білоус І. Ю., Буяк Н. А., Петрученко О. В. Енергоефективність короточасних режимів опалення будівель з різними теплофізичними характеристиками огорожувальних конструкцій. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування*. 2021. № 2. С. 32-41.
5. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Буяк Н. А., Петрученко О. В. Аналіз впливу енергоефективних режимів опалення на енергоспоживання будівель на основі математичного моделювання. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2020. № 4 (62). С. 32-41.
6. Кепко О. І., Кузьмін О. В., Кузьміна О. В., Лисенко О. В. Енергозберігаючі режими роботи систем опалення та вентиляції теплиць. *Науковий вісник НТУУ*. 2021. № 2. С. 15.
7. Беліков А. С., Железняков Є. О. Про питання забезпечення умов мікроклімату та безпеки експлуатації систем тепlopостачання при аварійних відключеннях тепlopостачання. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2018. № 5 (017). С. 96-102.
8. Енергетичний менеджмент та енергоефективність: підруч. для студ. зі спец. електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / І. О. Самойленко, О. Г. Гриб, А. О. Запорожець та ін. Харків: ФОП Бровін О. В., 2020. 348 с.
9. Схема роботи парової машини. Авторство: Panther. Власна робота; Drawn using Corel Draw! & Image Ready, CC BY-SA 3.0. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=268511> (дата звернення: 30.11.2024).
10. Viessmann. Climat of innovation. Керівництво з проектування. Теплові насоси. ТОВ «ВІССМАНН». 2011.
11. Тепловий насос ефективність. URL: <https://ovik.com.ua/ru/teplovoj-nasos-effektivnost/> (дата звернення: 30.11.2024).
12. Принцип роботи теплового насоса. URL: <https://teplotep.com.ua/2018/12/10/pryntsyproroboty-teploвого-nasosu/> (дата звернення: 30.11.2024).
13. Матеріал для ефективного вивчення здобувачами освіти ДПТНЗ електрообладнання пасажирських вагонів. URL: <https://naurok.com.ua/elektroobladnannya-pasazhirskih-vagoniv-310528.html> (дата звернення: 05.12.2024).
14. Працює в Харкові з 2006 року. Залізнична станція Залютино, в якій встановлено тепловий насос. URL: <https://nibe.ua/ru/example/zalutino1?srsId=AfmBOoqlkrI32FWxqCiyH2sCHiv7O6Aj5QNXWI6kCtYKSn4GCOdS51fM> (дата звернення: 30.11.2024).
15. Тарифи на розподіл АТ «Хмельницькобленерго». URL: <https://hoe.com.ua/page/tarifi-2> (дата звернення: 01.12.2024).
16. Купити вугілля в Харкові. URL: <https://iskra.kh.ua/ugol.html> (дата звернення: 01.12.2024).

Ананьєва Ольга Михайлівна, доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: ananeva@kart.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>.

Довгаль Сергій Олександрович, студент кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: sergo1978@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0323-0026>.

Терехов Єгор Сергійович, студент кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: asya.wear@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5340-9555>.

Ananieva Olha, Dr.Sc (Tech.), Professor of the Department of Automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ananeva@kart.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>.

Dovhal Serhii, student of Department of Automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: sergoy1978@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0323-0026>.

Terekhov Yehor, student of Department of Automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: asya.wear@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5340-9555>.

Статтю прийнято 12.12.2024 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.072.2

**ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТРАНСПОРТНО-СОЦІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
У ВИГЛЯДІ АНКЕТНИХ ОПИТУВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАКЕТІВ
СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ**

Канд. пед. наук Д. М. Копитков, кандидати техн. наук Г. О. Самчук, О. С. Черепакха

**THE RELIABILITY ASSESSMENT OF TRANSPORT AND SOCIOLOGICAL
RESEARCH AS A QUESTIONNAIRE SURVEY USING STATISTICAL DATA
PROCESSING PACKAGES**

PhD (Ped.) D. Kopytkov, PhD (Tech.) G. Samchuk, PhD (Tech.) O. Cherepakha

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320837>

***Анотація.** Наведено результати визначення надійності анкети з оцінювання ставлення пасажирів до складових якості міських пасажирських перевезень за допомогою методів математичної статистики, для чого використано найбільш розповсюджені статистичні пакети обробки даних, такі як MS Office Excel, Statgraphics, IBM Statistics SPSS і Statistica. Усі програми продемонстрували прийнятну придатність для розрахунку надійності. Найбільш функціональною виявилася програма Statistica, а найменш функціональною – MS Office Excel. Результати статистичного аналізу показали, що надійність опитувальника є достатньою і становить від 0,763 до 0,771, виходячи з результатів розрахунків усіх використаних статистичних програм.*

***Ключові слова:** міський пасажирський транспорт, анкета, якість, обстеження, надійність, програмне забезпечення.*

***Abstract.** Improving the quality of passenger services provided by mass transit is one of the most important areas in meeting the needs of society. People's standard of living depends on the quality of urban transportation services. In a market economy, mass transit users determine their satisfaction with the transportation services through various surveys. The surveys are a valuable source of information on the urban passenger transportation operational status and are usually organized in the form of questionnaires. At the same time, the questionnaire development errors can affect the study results and lead to incorrect conclusions. Consequently, the questionnaire reliability is important directly from the developing stage. The questionnaire reliability is the reproducibility of the study results and their resistance to the random factors interference. The questionnaire design inaccuracy should be eliminated by using statistical packages to assess the questionnaire content quality and calculate the Cronbach's alpha. From the coefficient values, it is possible to make a decision on the questionnaire internal consistency, its compliance with the purpose, reliability and application in practical work. Thus, the study used well-known statistical data processing packages such as MS Office Excel, Statgraphics Centurion, IBM SPSS and Statistica. A test sample of 20 respondents was used to check the questionnaire reliability and the respondents' opinion related to the passenger transportation quality components. In general, all data processing packages were suitable for calculating the alpha coefficient. From the all software considered, Statistica was the*

most functional due to wide range of helping tools while improving and evaluating a survey form, and MS Office Excel was the least functional since most calculations had to be performed manually. In the Statistica environment, simulating the number of questions and the value of alpha allows significant increasing the questionnaire quality. The results of the statistical analysis showed the questionnaire was quite reliable – from 0.763 to 0.771. According to passengers, the most important factors to generate the transportation quality were the travel cost, travel time, and passenger safety, and the least important are the service culture and the vehicle appearance. Further research should be aimed at developing and evaluating more comprehensive surveys on other features of passenger and freight transportation, and logistics.

Keywords: *urban passenger transportation, quality, questionnaire, survey, reliability, software.*

Вступ. Одним із найефективніших інструментів збору інформації про громадську думку є опитування. Соціологічні дані, отримані в такий спосіб, допомагають аналізувати проблемні питання, урахувавши думки великої кількості респондентів, з метою ухвалення раціональних рішень у різних галузях науки та економіки.

Відомі переваги опитування (масовість, оперативність, стандартизація відповідей, можливість обробки методами математичної статистики) роблять його цінним джерелом отримання інформації про стан функціонування міського пасажирського транспорту. На цьому виді пасажирського транспорту результати обстежень думок пасажирів частіше за все реалізовані як анкетні опитування [1], є підґрунтям для можливих змін в організації роботи окремих видів або маршрутів міського транспорту (відкриття або закриття, обґрунтування трас, визначення або зміна тривалості роботи маршрутів, інтервалів руху, кількості й типу рухомого складу на маршрутах і т. ін.) і удосконаленні функціонування всієї пасажирської транспортної системи міста (вивчення транспортної поведінки пасажирів, чинників із вибору маршруту пересування користувачами міського транспорту, закономірностей формування пасажиропотоків тощо).

Водночас помилки на етапі розроблення анкети (наприклад неточне або незрозуміле для респондента формулювання питання чи неправильна

шкала відповідей) можуть серйозно вплинути на результати дослідження та призвести до необ'єктивних висновків. Отже, з розробленням анкети важливо, щоб вона була надійною. Під надійністю анкети розуміють відтворюваність результатів дослідження та її стійкість до впливу випадкових чинників [2].

Як свідчать дослідження [3], на сьогодні в обстеженнях, проведених у різних галузях науки, використовують анкетні форми, внутрішня узгодженість, послідовність і доцільність питань у яких часто залишаються невідомими, що викликає сумніви щодо надійності отриманих даних і якості можливих управлінських чи інших рішень, що мають бути вироблені на основі інформації анкетного опитування.

Урахувавши велику соціально-економічну значущість і розміри інфраструктури пасажирського транспорту сучасних міст, невідповідні керівні дії (або їх відсутність), вжиті на основі неякісних анкетних обстежень, можуть призвести до значних необґрунтованих витрат у цій сфері, погіршення якості транспортного обслуговування або негативного ставлення пасажирів до функціонування міського транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення якості пасажирських перевезень міським транспортом є одним із найважливіших напрямів задоволення потреб суспільства. Якість послуг, наданих міським

транспорт, визначає рівень життя мешканців країни. За умов ринкової економіки саме споживачі (пасажирів) мають визначати ступінь відповідності або задоволення рівнем транспортних послуг, наданих їм, через проведення різних форм опитувань. Якістю є ступінь, до якого сукупність власних характеристик задовольняє вимоги, сформовані потреби чи очікування, загальнозрозумілі чи обов'язкові [4]. Отже, слід детально розглянути, які характеристики (складові) входять до цього поняття якості міських пасажирських перевезень, на думку вітчизняних і закордонних дослідників.

Автори роботи [5] пропонують використовувати транспортну стомлюваність пасажирів під час поїздки як єдиний узагальнюючий показник якості пасажирських перевезень, хоча якість, як відомо, являє собою комплексний показник. У дослідженні [6] пропонується вважати складовими якості такі показники, як час пішого пересування, час очікування, час поїздки та динамічний коефіцієнт використання місткості. У роботі [7] якість обслуговування пасажирів можна визначити через велику кількість безрозмірних коефіцієнтів доступності, комфорту та надійності тощо, що передбачають додаткові розрахунки й неможливість безпосереднього використання відповідей пасажирів. Дослідження [8] продемонструвало 10 критеріїв якості пасажирських перевезень, серед яких, на нашу думку, є доволі громіздкі для розуміння звичайним пасажиром семантичні конструкції («пунктуальність курсування», «можливість доїзду без пересадок», «надійність відбуття запланованого рейсу», «віддаленість зупинок») або майже дублюючі один одного («пунктуальність курсування», «надійність відбуття запланованого рейсу», «частота курсування» і т. ін.). У роботі [9] наведено більше 20 чинників, що впливають на якість пасажирських перевезень, серед яких є такі, що мають досить нечіткі визначення і їх

майже не може визначити пасажир безпосередньо під час анкетування (наприклад «якість маршрутних мереж», «гігієнічність» та ін.). У статті [10] наведено 18 критеріїв оцінювання якості приміських пасажирських перевезень, проведено статистичне оцінювання думок експертів (пасажирів) і зроблено висновок, що найвагомішими чинниками вибору виду приміського пасажирського транспорту за якість є час руху, вартість проїзду і час очікування. Автори роботи [11] подали доволі складні критерії якості транспортного обслуговування населення («критерій економічного стимулювання використання та розвитку міського транспорту», «критерій використання пропускну спроможності транспортної інфраструктури» та ін.), які унеможливають їх використання пасажирами протягом опитування. У роботі [12] автори, спираючись на нормативну базу автомобільного транспорту, наводять загальну класифікацію часткових показників і відзначають відсутність єдиної методики з оцінювання якості пасажирських автотранспортних послуг.

Не зменшуючи науково-практичну цінність вищевказаних робіт, можна дійти загального висновку, що переважна більшість досліджень має констатуючий характер і не містить результатів статистичного оцінювання якості як анкетного опитування в цілому, так і окремих складових, а також спирається на доволі складні у визначенні показники, що, на думку авторів, і утворюють якість міських пасажирських перевезень.

Закордонні вчені також приділяють значну увагу вивченню якості міських пасажирських перевезень у містах і розробленню відповідних показників її вираження. У роботі [13] проведено статистичне оцінювання значущості чинників, що формують якість перевезень пасажирів у містах, і зроблено висновок, що такими показниками є частота руху та наявність вільних місць для сидіння в салоні автобуса. Автори статті [14], застосувавши

розгорнуту функцію якості, виділили такі найвагоміші складові якості перевезень пасажирів: умови праці, орієнтовані на працівників пасажирського транспорту; компетентність працівників пасажирського транспорту, доброзичливе ставлення працівників міського транспорту до пасажирів, безвідмовна робота автобусів на маршруті, експлуатаційні характеристики автобусів. Дослідження [15] виявило і статистично підтвердило значущість надійності, гнучкості, відповідальності, гарантії прибуття в очікуваний час і ввічливого ставлення до пасажирів під час надання пасажирських послуг із боку операторів. Автори роботи [16], використовуючи підхід SERVQUAL, встановили, що найбільш вагомими показниками якості пасажирських послуг є безпека під час перевезень, надійність надання послуг автобусами, чистота автобусів і частота їхнього руху за маршрутами. У роботі [17] запропоновано «агрегований індекс задоволення споживачів», який можна використовувати для кількісного оцінювання якості послуг громадського транспорту, а найбільш значущими складовими такого індексу, за результатами опитування користувачів, є час очікування та грошові витрати на переміщення міським транспортом. У звіті Бюджетного управління Конгресу США [18] узагальнюючим показником якості функціонування галузі транспорту, у тому числі й пасажирського, вважають зниження викидів вуглекислого газу як основну причину утворення «парникового ефекту», на боротьбу з яким тепер західні країни витрачають доволі багато зусиль. Протягом останнього часу у зв'язку з інтенсивним втіленням у теорію та практику пасажирських перевезень концепції «сталого» розвитку міського транспорту в дослідженні [19] сталість і екологічність («sustainable and green transportation») вважають сучасними показниками якості функціонування масового пасажирського транспорту і якості життя людини в цілому.

Отже, і серед закордонних авторів нема єдиної думки щодо уніфікованих показників з оцінювання якості міських пасажирських перевезень, а сам показник або їхню сукупність визначено метою дослідження.

У цілому ж, як випливає з вітчизняних і закордонних досліджень, наведених вище, а також оглядових досліджень загальних світових практик щодо визначення якості послуг міського пасажирського транспорту [20, 21], загальноприйнятими показниками якості є доступність обслуговування (відстані між автобусними зупинками, розташування автобусних зупинок і послуги, частота обслуговування, тривалість обслуговування, час у дорозі, потреба в пересадках); надійність обслуговування (дотримання встановлених інтервалів руху або часу прибуття автобуса до певного зупинного пункту), зручність користування як у салоні автобуса, так і під час його очікування (м'які та чисті сидіння, комфортна температура повітря, помірна кількість людей у салоні, плавність руху автобуса, низький рівень шуму та вібрації, відсутність неприємних запахів; захист від вітра, опадів і т. ін.); чистота автобуса і його салону; безпека (безаварійність) перевезень і власна безпека (захист від нападів злочинців у салоні або під час очікування); тариф перевезень (прийнятність для більшості категорій населення, наявність знижок у разі постійного користування маршрутом або видом транспорту); інформація про роботу маршруту або вид транспорту; турбота про пасажирів; екологічний вплив транспорту на пасажирів і довкілля.

Наведені вище вітчизняні та закордонні підходи до показників якості пасажирських перевезень у подальшому використовуватимуть для створення і статистичного оцінювання надійності анкети з визначення складових якості пасажирських перевезень.

Після аналізу підходів щодо визначення складових якості міських

пасажирських перевезень також доцільно розглянути і загальні підходи для складення анкет щодо раціональної кількості питань у них і методів оцінювання їхньої надійності. Зі збільшенням кількості запитань (або тверджень) вплив випадкових факторів зменшується, а надійність шкали вимірювання зростає, що може бути забезпечено анкетною з кількістю 25–30 запитань [22].

Однак занадто велика кількість запитань може втомити респондентів, погіршити їхнє розуміння проблемного питання та знизити ефективність опитування, тому воно має містити лише визначення, які найповніше висвітлюють досліджувану проблему. Джерелом отримання потрібної інформації на міському пасажирському транспорті, урахувавши умови його функціонування, є натурні обстеження. Отже, середовищем проведення опитування в більшості випадків може бути салон транспортного засобу, що рухається маршрутом, зупинний пункт громадського транспорту або певна ділянка вулиці, до анкетного обстеження висувають підвищені вимоги щодо стислості, ємності, зрозумілості та оперативності використання анкетних форм обліковцями і респондентами. Для випадків, коли важливо забезпечити оперативність опитування, рекомендована кількість питань в анкеті складає 5–15 [23].

Основні методи оцінювання надійності анкет або тестів [24]: перевірка внутрішньої узгодженості між твердженнями, що утворюють шкалу анкети або тесту (розрахунок альфа-статистики Кронбаха або альфа Кронбаха); розщеплення шкали (опитувальника) і аналіз кореляції між її частинами (розрахунок коефіцієнтів Спірмена-Брауна, Гутмана); перевірка ретестової надійності, базованої на порівнянні та аналізі результатів вимірювань із використанням однієї й тієї самої шкали однієї вибірки респондентів у різні проміжки часу

(розрахунок коефіцієнта Спірмена-Брауна, Рюлона і т. ін.).

Два останні методи належать переважно до оцінювання тестів навчальних досягнень (наприклад успішності учнів), тому надалі детально зупинимося на практичному використанні та оцінюванні першого методу, тобто внутрішньої узгодженості між твердженнями, що має універсальне застосування та може бути реалізований за допомогою сучасного програмного забезпечення для статистичної обробки даних у будь-якій галузі, у тому числі й на міському пасажирському транспорті.

Отже, надійність анкети оцінюють за допомогою коефіцієнта альфа Кронбаха (скорочено – α -Кронбаха), виходячи зі значень якого можна ухвалити рішення щодо внутрішньої узгодженості питань анкети, її відповідності меті, надійності й, як наслідок, доцільності застосування у практичних дослідженнях. Кожен ступінь надійності анкети або тесту відповідає таким коефіцієнтам: $\geq 0,9$ – дуже добре; $> 0,8$ – добре; $> 0,7$ – достатньо; $> 0,6$ – сумнівно; $> 0,5$ – погано; $\leq 0,5$ – недостатньо (неприйнятно) [25]. Наведеному розподілу і тлумаченню піддаються лише додатні значення α -Кронбаха. Будь-яке від'ємне значення вказує на повну неузгодженість питань, відсутність надійності та практичної значущості анкети. Оскільки в основі оцінювання надійності лежать математичні розрахунки, якісним характеристикам, що може містити анкета («добре/погано», «задоволений/незадоволений» тощо), має бути наданий кількісний або цифровий еквівалент. Формула розрахунку α -Кронбаха є такою:

$$\alpha = \frac{n}{n-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n s_i^2}{s_{sum}^2} \right), \quad (1)$$

де n – кількість запитань у тесті або анкеті;
 s_i^2 – вибіркова дисперсія i -го запитання;

S_{sum}^2 – вибіркова дисперсія всього тесту або анкети.

В анкеті можуть виникати взаємні кореляційні зв'язки між дисперсіями рангів певних стверджень анкети (питаннями анкети) і дисперсією рангу кожного окремого запитання та загальною дисперсією рангів у цілому по анкеті, як і впливає з залежності (1). Наявність і сила таких зв'язків, насамперед дисперсій рангів окремих запитань із загальною дисперсією рангів, є підґрунтям для доцільності включення, виключення або певної переробки конкретного запитання з анкети у випадку занадто слабкої ($< 0,3$) або занадто значної ($> 0,9$) сили кореляції [26]. Занадто слабка (або відсутня) кореляція свідчить, що запитання анкети не відповідає її меті і не має жодного внеску для висвітлення проблеми, вирішенню якої присвячено анкетне опитування. У той же час дуже висока сила кореляції свідчить про відсутність незалежності запитань (тверджень), їхній взаємозв'язок, «впливання» наступного питання з попереднього тощо, що є небажаним під час складання анкет й проведення анкетного опитування [27].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення надійності анкети щодо вагомості складових якості перевезень пасажирів міським транспортом. Відповідно до мети дослідження потрібно вирішити такі завдання: 1) проаналізувати вітчизняні та закордонні підходи для визначення якості міських пасажирських перевезень і її складових; 2) проаналізувати теоретичні підходи для визначення надійності анкет; 3) експериментально перевірити надійність анкети засобами різних пакетів статистичної обробки даних, таких як MS Office Excel, Statgraphics Centurion, IBM SPSS і Statistica; 4) зробити висновки щодо надійності розробленої анкети і доцільності використання статистичного програмного забезпечення для визначення якості анкет із транспортно-соціологічних обстежень.

Основна частина дослідження.

Ураховуючи наведені вище часткові показники або складові якості міських пасажирських перевезень, було створено анкету з визначення важливості складових якості міських перевезень для пасажирів. Через особливості проведення анкетних обстежень на транспорті влітку 2023 року в м. Харків протягом пробного обстеження (п'ять днів) було опитано 22 респонденти віком від 18 до 65 років, які користувалися міським транспортом для поїздок до роботи. До пробної вибірки ввійшли представники робітничих професій, інженерно-технічні працівники (менеджери, інженери) і державні службовці. У стані, придатному для подальшого використання, було повернуто 20 анкет. У дослідженні анкета являла собою перелік 10 можливих складових якості міських пасажирських перевезень, коротко поданих в опитувальній формі для розуміння різними верствами населення та оперативності проведення дослідження. Для кожної зі складових якості пасажирських перевезень необхідно було визначити бал (ранг), що відповідав важливості часткового показника для конкретного учасника опитування. Отже, три бали означали «дуже важливий», два – «важливий», один – «неважливий».

Через відносно невелику кількість учасників обстеження анкети було розповсюджено в паперовій формі. Відповіді надавали заочно, а заповнені паперові форми потім повертали організаторам дослідження. Анкети є схожими за формою на особистісні опитувальники (тести) або тести навчальних досягнень, але, на відміну від останніх, не мають суворих, стандартизованих критеріїв оцінювання або інтерпретації, що додатково підвищує значущість перевірки якості цього виду звітності. Приклад заповненої анкети наведено на рис. 1.

Отже, за прийнятної надійності наведеної анкети, яку і належить визначити та оцінити, і достатнього обсягу вибірки цей опитувальник може бути, наприклад,

джерелом важливої інформації щодо напрямів покращення або удосконалення роботи міського пасажирського транспорту.

**АНКЕТА З ВИЗНАЧЕННЯ ВАЖЛИВОСТІ СКЛАДОВИХ ЯКОСТІ
МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ**

Шановний пасажире!

Будь ласка, приділіть небагато уваги та часу та дайте відповіді на нескладні питання нашої анкети щодо важливості, яку мають для вас складові якості міських пасажирських перевезень під час користування громадським транспортом.

Зазначте Вашу стать: чоловік; жінка.

Зазначте Ваш вік: 10 – 20; 30 – 40; 40 – 50; 50 – 60; 60 – 70;

Зазначте Ваш соціальний статус:

робітник; інженер (менеджер, керівник); безробітний; пенсіонер.

Зазначте, яку важливість для вас мають нижченаведені показники якості міських пасажирських перевезень:

1 – час поїздки: 3 – дуже важливий; 2 – важливий; 1 – неважливий.

2 – витрати на проїзд: 3 – дуже важливий; 2 – важливий; 1 – неважливий.

3 – відсутність пересадок: 3 – дуже важливий; 2 – важливий; 1 – неважливий.

4 – комфорт очікування транспортного засобу: 3 – дуже важливий; 2 – важливий; 1 – неважливий.

5 – комфорт поїздки у транспортному засобі: 3 – дуже важливий; 2 – важливий; 1 – неважливий.

6 – культура обслуговування: 3 – дуже важливий; 2 – важливий; 1 – неважливий.

7 – зовнішній вигляд транспортного засобу: 3 – дуже важливий; 2 – важливий; 1 – неважливий.

8 – екологічність транспортного засобу: 3 – дуже важливий; 2 – важливий; 1 – неважливий.

9 – безпека перевезень пасажирів: 3 – дуже важливий; 2 – важливий; 1 – неважливий.

10 – інформаційне забезпечення поїздки: 3 – дуже важливий; 2 – важливий; 1 – неважливий.

Дякуємо за Ваші відповіді!

Рис. 1. Приклад заповнення анкети з визначення складових якості міських пасажирських перевезень

Розрахункові дані у вигляді, придатному для подальшої обробки за

допомогою різних статистичних пакетів, наведено в таблиці.

Таблиця

Рангова оцінка важливості складових міських перевезень респондентами

Респондент	Показник									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3	3	2	2	3	1	1	2	3	3
2	2	3	3	2	3	2	2	3	3	2
3	3	3	2	3	1	3	2	2	3	3
4	2	3	3	2	2	2	2	3	3	2
5	3	3	2	3	2	2	2	3	3	3
6	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2
7	3	3	2	3	2	2	3	2	3	2
8	2	3	2	3	3	2	1	2	3	3
9	3	2	3	2	1	2	2	2	3	2
10	3	3	2	2	3	2	2	3	3	3
11	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2
12	3	3	2	2	2	2	2	2	3	2
13	3	3	3	2	3	2	2	2	3	1
14	2	3	2	2	2	3	2	3	3	3
15	3	3	2	3	2	2	2	2	3	2
16	3	3	2	2	3	2	2	3	3	2
17	2	2	3	2	3	2	2	3	3	2
18	3	3	3	3	2	1	1	2	3	2
19	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1
20	2	3	3	2	3	3	2	2	3	2
Разом за показником	52	57	49	47	48	43	39	48	58	44

Відповідно до мети дослідження наступним етапом є оцінювання якості анкети, тобто перевірки внутрішньої узгодженості запитань і визначення надійності вищенаведеними засобами статистичної обробки даних – MS Office Excel, Statgraphics Centurion, IBM SPSS і Statistica.

Результати розрахунку коефіцієнта α -Кронбаха в середовищі MS Office Excel 2016 із використанням функції «Двофакторний дисперсійний аналіз без повторень» наведено на рис. 2.

За результатами розрахунку в пакеті MS Office Excel 2016, надійність наведеної анкети складає 0,766, яку можна вважати за

достатню [25] і використовувати її для подальших досліджень, як і було зазначено раніше. До переваг визначення цього коефіцієнта в середовищі MS Office Excel можна віднести доступність такого статистичного пакета обробки даних, простоту, оперативність і можливість розрахунку навіть за невеликої кількості респондентів і варіантів відповідей. Недоліками є відсутність «автоматизації» і необхідність послідовного «ручного» виконання певних дій із розрахунку, які іноді можуть бути невідомими досліднику, відсутність безпосереднього відображення кореляційного зв'язку між дисперсією рангів конкретного твердження та

загальною дисперсією у цілому по анкеті, який є показником доцільності включення, виключення або певної переробки такого

запитання анкети у випадку сили кореляції, що не задовольняє вищезазначені вимоги.

Two Factor Without Replication							
SUMMARY	Count	Sum	Average	Variance			
Row 1	10	22	2,2	0,6222222			
Row 2	10	25	2,5	0,2777778			
Row 3	10	25	2,5	0,5			
Row 4	10	24	2,4	0,2666667			
Row 5	10	26	2,6	0,2666667			
Row 6	10	26	2,6	0,2666667			
Row 7	10	25	2,5	0,2777778			
Row 8	10	24	2,4	0,4888889			
Row 9	10	22	2,2	0,4			
Row 10	10	26	2,6	0,2666667			
Row 11	10	24	2,4	0,2666667			
Row 12	10	23	2,3	0,2333333			
Row 13	10	24	2,4	0,4888889			
Row 14	10	25	2,5	0,2777778			
Row 15	10	24	2,4	0,2666667			
Row 16	10	25	2,5	0,2777778			
Row 17	10	24	2,4	0,2666667			
Row 18	10	23	2,3	0,6777778			
Row 19	10	22	2,2	0,4			
Row 20	10	25	2,5	0,2777778			
Column 1	20	52	2,6	0,2526316			
Column 2	20	57	2,85	0,1342105			
Column 3	20	49	2,45	0,2605263			
Column 4	20	47	2,35	0,2394737			
Column 5	20	48	2,4	0,4631579			
Column 6	20	43	2,15	0,3447368			
Column 7	20	39	1,95	0,2605263			
Column 8	20	48	2,4	0,2526316			
Column 9	20	58	2,9	0,0947368			
Column 10	20	43	2,15	0,3447368			
Analysis of variance							
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-Value	F crit	
Rows	3,12	19	1,18421	0,5951674	0,00906404	1,64770369	
Columns	16,42	9	1,82444	6,6125477	4,36215E-08	1,93498765	
Error	47,18	171	0,27691				
Total	66,72	199					
Cronbach's Alpha	0,766	=1-(D41/D39)					

Рис. 2. Результати розрахунку коефіцієнта альфа Кронбаха в програмному середовищі MS Office Excel 2016

Отже, більш інформативним і якісним щодо вивчення наявності та сили зв'язків, а також шляхів подальшого удосконалення анкети є використання спеціалізованих пакетів статистичної обробки даних, наприклад Statgraphics, IBM Statistics SPSS і Statistica. Вибір саме цього програмного забезпечення пов'язаний із тим, що воно вже має вбудований інструмент за загальною назвою «Reliability Analysis» («Аналіз надійності»), який безпосередньо використаний для визначення внутрішньої узгодженості різних видів тестів та анкет, і значно автоматизує та пришвидшує відповідні розрахунки.

На рис. 3 наведено результати з визначення надійності вищенаведеної анкети за допомогою різних пакетів обробки статистичних даних.

З результатів розрахунку за всіма пакетами статистичної обробки даних, наведеними на рис. 3, основними є коефіцієнт α -Кронбаха для анкети в цілому, сила зв'язку між змістом кожного окремого запитання та загальною метою або змістом анкети (математично – зв'язок між дисперсією рангів кожного окремого запитання та загальною дисперсією рангів анкети в цілому) і зміна коефіцієнта α -Кронбаха в бік збільшення в разі вилучення запитань із низькою кореляцією («Alpha if

Omitted» або «Alpha if Deleted»). Коефіцієнти α -Кронбаха відповідно до розрахунків усіх статистичних пакетів є

майже ідентичними (від 0,763 у Statgraphics Centurion 18 до 0,771 у IBM SPSS Statistics 26) із розходженням у 0,008 або 1 %, що також свідчить про достатню надійність анкети.

Item Reliability Analysis

Variable	Count	Sample Mean	Std. Deviation
Col_1	20	2,6	0,502625
Col_2	20	2,85	0,366348
Col_3	20	2,45	0,510418
Col_4	20	2,35	0,48936
Col_5	20	2,4	0,680557
Col_6	20	2,15	0,587143
Col_7	20	1,95	0,510418
Col_8	20	2,4	0,502625
Col_9	20	2,9	0,307794
Col_10	20	2,15	0,587143
Sum	20	24,2	1,28145

Cronbach's alpha = 0,763418 (95% lower confidence bound = 0,408244)

Omitted Item Statistics

Omitted Variable	Adj. Sum Mean	Adj. Sum Std. Deviation	Item-Total Correlation	Squared Multiple R	Alpha if Omitted
Col_1	21,6	1,50088	0,566349	0,687099	0,754584
Col_2	21,35	1,22582	0,629886	0,555532	0,739841
Col_3	21,75	1,48235	0,528711	0,709236	0,741414
Col_4	21,85	1,22582	0,509768	0,511143	0,754737
Col_5	21,8	1,28145	0,449961	0,500955	0,762613
Col_6	22,05	1,09904	0,094499	0,190935	0,818618
Col_7	22,25	1,20852	0,205355	0,246539	0,808783
Col_8	21,8	1,15166	0,3622165	0,698548	0,769176
Col_9	21,3	1,21828	0,630297	0,534865	0,726327
Col_10	22,05	1,09904	0,364296	0,858124	0,783889

The StatAdvisor

This analysis estimates the reliability (consistency) of a set of variables. The primary statistic for measuring reliability is Cronbach's alpha, which equals 0,763418 for the 10 selected variables. As a general rule, an alpha equal to 0,7 or larger is considered to represent a reliable set of variables.

Also displayed are statistics that show the impact of omitting each variable while retaining all of the others. The variables which if omitted would give the largest increase in alpha are Col_6 and Col_7.

a

Reliability

Scale: ALL VARIABLES

Case Processing Summary

		N	%
Cases	Valid	20	100,0
	Excluded ^a	0	,0
	Total	20	100,0

a. Listwise deletion based on all variables in the procedure.

Reliability Statistics

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of items
,771	,774	10

Item-Total Statistics

	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item-Total Correlation	Squared Multiple Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
VAR00001	21,6000	2,253	0,629	0,496	0,763
VAR00002	21,3500	1,503	0,676	0,557	0,744
VAR00003	21,7500	2,197	0,562	0,416	0,752
VAR00004	21,8500	1,503	0,618	0,478	0,738
VAR00005	21,8000	1,642	0,508	0,358	0,779
VAR00006	22,0500	1,208	0,223	0,150	0,841
VAR00007	22,2500	1,461	0,284	0,181	0,832
VAR00008	21,8000	1,326	0,436	0,291	0,798
VAR00009	21,3000	1,484	0,659	0,534	0,741
VAR00010	22,0500	1,208	0,426	0,281	0,792

б

Рис. 3. Результати визначення надійності анкети за допомогою різних пакетів обробки статистичних даних (початок)

Summary for scale: Mean=20,2500 Std.Dv.=2,02290 Valid N:20 (Spreadsheet1) Cronbach alpha: ,76885 Standardized alpha: ,78436 Average inter-item corr.: ,4678						
variable	Mean if deleted	Var. if deleted	Stdv. if deleted	Itm-Totl Correl.	Alpha if deleted	
Var1	18,30000	5,110000	2,260531	0,581043	0,762241	
Var2	18,25000	2,887500	1,699265	0,615507	0,743691	
Var3	18,25000	4,387500	2,094636	0,542368	0,752472	
Var4	18,15000	4,127500	2,031625	0,515200	0,762723	
Var5	18,10000	4,090000	2,022375	0,459048	0,771893	
Var6	18,20000	3,360000	1,833030	0,194816	0,834781	
Var7	18,35000	3,127500	1,768474	0,238262	0,822304	
Var8	18,15000	2,827500	1,681517	0,389015	0,784236	
Var9	18,40000	3,040000	1,743560	0,640346	0,737945	
Var10	18,10000	4,790000	2,188607	0,341252	0,793149	

в

Рис. 3. Результати визначення надійності анкети за допомогою різних пакетів обробки статистичних даних (продовження): а – Statgraphics Centurion 18; б – IBM SPSS Statistics 26; в – Statistica 12

За результатами статистичного аналізу в усіх середовищах обробки даних запитання 6 і 7 анкети продемонстрували низький кореляційний зв'язок ($< 0,3$) і мають бути вилучені з анкети, що призведе до відповідного збільшення результуючого

α -Кронбаха від 0,818 до 0,834 згідно з розрахунками за різними статистичними пакетами. Отже, кінцевий варіант анкети має містити вісім запитань, що не суперечить «довжині» анкети в разі

проведення досліджень з оперативного вирішення проблемного питання [23].

Якщо розглядати причинно-наслідкові зв'язки «слабкості» або недоречності тверджень 6 і 7, то ймовірна така ситуація, що культуру спілкування працівників міського транспорту (питання 6) і зовнішній вигляд транспортного засобу (питання 7) за важких соціально-економічних умов, що склалися у країні, пасажери вважають за найменш важливі, ніж інші показники якості перевезень.

До того ж, програмне середовище Statistica дає змогу і далі моделювати як саме значення α -Кронбаха, тобто надійність, так і кількість запитань в анкеті (тесті), як і показано на рис. 4.

Як видно з рис. 4, а, використання функції «More items?» («Наскільки більше пунктів анкети?») відображує, наскільки зросте надійність опитувальника або тесту з додаванням заданої кількості запитань або тверджень. Виходячи з наведеного

прикладу, додавання двох запитань призведе до збільшення α -Кронбаха з 0,766 до 0,792. Рис. 4, б, демонструє зворотну ситуацію, коли з заданим значенням α -Кронбаха за допомогою функції «How many?» («Як багато пунктів анкети додати?») можна визначити кількість запитань, що необхідно додати до анкети. Так, з прикладу можна побачити, що для досягнення значення α -Кронбаха 0,85 до вже наявних запитань анкети потрібно додати ще сім. При цьому програма передбачає, що взаємна кореляція між новими пунктами буде такою самою, як і між вже наявними пунктами анкети. Але це лише припущення програмного середовища, яке може допомогти досліднику ухвалити рішення щодо того, у який спосіб збільшувати надійність анкети. Будь-яке фактичне додавання або видалення запитань або тверджень кожного разу бажано перевіряти проведенням нового аналізу надійності.

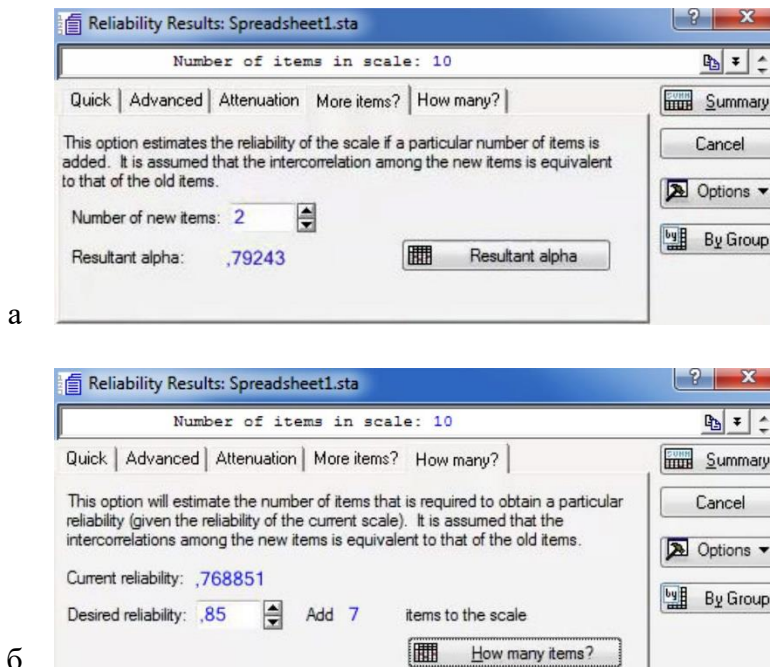


Рис. 4. Моделювання величини α -Кронбаха та кількості потрібних запитань в анкеті: а – моделювання величини α -Кронбаха за заданої кількості нових пунктів анкети за допомогою функції «More items?»; б – моделювання кількості пунктів анкети, що потрібно додати, за заданого α -Кронбаха за допомогою функції «How many?»

У цілому ж, як видно з результатів розрахунків, усі розглянуті статистичні пакети дають змогу з різним ступенем автоматизації, який є найменшим у Microsoft Office Excel, досягти поставленої мети, тобто оцінити надійність анкети або тесту. Але найбільшу функціональність, на нашу думку, має саме пакет Statistica, який дає досліднику змогу удосконалити анкету через видалення або додавання до неї запитань з одночасним відображенням змін у коефіцієнті α -Кронбаха без необхідності запуску повної процедури статистичного аналізу внутрішньої послідовності.

За виключенням Microsoft Office Excel, у якому розрахунки є лише частково автоматизованими, в інших статистичних пакетах є один загальний недолік, а скоріше особливість, – можлива відмова у визначенні надійності за відносно малою кількістю запитань в анкеті та респондентів (зазвичай коли їх не більше п'яти), що виражено в генеруванні повідомлення про недостатність даних або розрахунку нульової надійності. Це, імовірно, має спонукати дослідників до складання більш якісних анкет із достатньою кількістю змістовних запитань і проведення дослідження на достатньо великій вибірці респондентів.

Висновки. За належної математико-статистичної обробки анкетне опитування є одним із ефективних методів вивчення громадської думки про якість і параметри функціонування міського пасажирського транспорту. Однак підхід до якості складання анкет залишається серйозною проблемою таких досліджень, що пов'язано з відсутністю оцінювання внутрішньої послідовності, доречності чи релевантності запитань і загалом надійності анкети.

Виключити такі недоліки і суттєво прискорити розрахунки можна шляхом використання пакетів статистичної обробки даних, які дають змогу оцінювати якість

змісту анкети за допомогою розрахунку коефіцієнта α -Кронбаха. Отже, у дослідженні використовували такі статистичні пакети обробки даних, як MS Office Excel через їхню доступність і широку розповсюдженість, Statgraphics Centurion, IBM SPSS та Statistica, які вже мають надбудову оцінювання надійності за загальною назвою «Reliability Analysis».

На пробній вибірці з 20 респондентів було оцінено надійність анкети і ставлення респондентів до складових якості міських пасажирських перевезень. У цілому всі пакети обробки даних продемонстрували свою придатність для розрахунку коефіцієнта α . При цьому найбільш функціональним виявився пакет Statistica, найменш функціональним – пакет MS Office Excel, у якому більшість операцій виконували вручну. Статистичний аналіз продемонстрував достатню надійність анкети – у межах від 0,763 до 0,771, за результатами обчислення різних статистичних пакетів. На думку пасажирів, найбільш вагомими складовими, що формують якість перевезень, виявилися витрати на проїзд, час поїздки та безпека перевезень пасажирів, найменш вагомими – культура обслуговування та зовнішній вигляд транспортного засобу. Питання про ці дві складові якості й були вилучені з кінцевої форми анкети, що мало призвести до збільшення підсумкового коефіцієнта α .

Подальшим напрямом досліджень може бути створення більш складних анкет з інших аспектів функціонування пасажирського та вантажного транспорту, логістики та інших суміжних галузей із метою наступної перевірки цих опитувальників на внутрішню узгодженість і релевантність запитань і, як наслідок, доцільність практичного застосування з метою вироблення науково-обґрунтованих управлінських рішень.

Список використаних джерел

1. Копитков Д. М. Статистична оцінка результатів досліджень з підвищення якості пасажирських перевезень у містах. *Наукові нотатки*. 2016. № 55. С. 206–211. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_55_42 (дата звернення: 11.10.2024).
2. Samuel A. Livingston. Test Reliability – Basic Concepts. Princeton, New Jersey: Educational Testing Service. 2018. 46 p. URL: <https://www.ets.org/Media/Research/pdf/RM-18-01.pdf> (last access: 11.10.2024).
3. Мінцер О. П., Сіненко Н. О. Валідність та логіка анкетування в процесах прийняття рішень. *Медична інформатика та інженерія*. 2021. № 1. С. 84–88. URL: <https://doi.org/10.11603/mie.1996-1960.2021.1.12193> (дата звернення: 11.10.2024).
4. ДСТУ ISO 9000:2007. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. URL: https://dnaop.com/html/32617/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_ISO_9000_2007 (дата звернення: 11.10.2024).
5. Вакуленко К. Є., Харченко В. Ф. Щодо якості перевезень на маршрутах міського пасажирського транспорту. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 3 (4). С. 57–59. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2012_3%284%29__13 (дата звернення: 11.10.2024).
6. Chumachenko I. V., Davidich Yu. A., Galkin A. S., Davidich N. V. Quality Assessment of Passenger Transportation by Urban Transport While Using Various Number of Fixed-Route Transport Facilities. *Science and Technique*. 2017. № 16 (5). P. 415–421. URL: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-415-421> (last access: 11.10.2024).
7. Тарандушка Л. А., Шльончак І. А., Тарандушка І. П. Оцінка якості обслуговування пасажирів міським транспортом загального користування в м. Черкаси. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2002. № 5 (36). Ч. II. С. 253–261. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.253-26](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.253-26) (дата звернення: 11.10.2024).
8. Маргіта Н. О., Ярема Н. О. Оцінка якості системи транспортного обслуговування пасажирів м. Львова. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2017. № 16 (2). С. 10–14. URL: http://visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/16_2_2017ua/4.pdf (дата звернення: 11.10.2024).
9. Віниченко В. С., Тарасюк І. Ю. Аналіз факторів і умов, які впливають на якість пасажирських перевезень на міському пасажирському транспорті. *Комунальне господарство міст*. 2011. № 99. С. 369–374. URL: https://eprints.kname.edu.ua/21803/1/369-374_Віниченко_ВС.pdf (дата звернення: 11.10.2024).
10. Григорова Т. М. Питання вибору пасажирями виду приміського пасажирського транспорту. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2015. № 2 (46). С. 180–188. URL: <https://doi.org/10.15276/oru.2.46.2015.31> (дата звернення: 11.10.2024).
11. Іванов І. Є., Вдовиченко В. О. Структура адаптивної резонансної моделі управління якістю транспортного обслуговування міським громадським пасажирським транспортом. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2021. № 19. С. 60–73. URL: <https://doi.org/10.30977/VIET.2021.19.0.60> (дата звернення: 11.10.2024).
12. Никитюк М., Стригунова М. Пасажирські автотранспортні послуги: класифікація показників якості. *Стандартизація. Сертифікація. Якість*. 2011. № 5. С. 53–55. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ssia_2011_5_18 (дата звернення: 11.10.2024).
13. Mazzulla G., Eboli L. A service quality experimental measure for public transport. *European Transport / Trasporti Europei*. 2006. No. 34. P. 42–53. URL: https://www.openstarts.units.it/dspace/bitstream/10077/5928/1/Mazzulla_Eboli_ET34.pdf (last access: 11.10.2024).

14. Pakdil F., Kurtulmuşoğlu F. B. Improving service quality in highway passenger transportation: a case study using quality function deployment. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2014. No. 14 (4). URL: <https://doi.org/10.18757/ejtir.2014.14.4.3043> (last access: 11.10.2024).
15. Meghna V., Ashis V., Ajith P., Sneha S. Urban bus transport service quality and sustainable development: understanding the gaps. *13th World Conference on Transport Research. July 15–18, 2013 – Rio de Janeiro, Brazil*. P. 1–16. URL: <http://www.wctrs-society.com/wp-content/uploads/abstracts/rio/selected/1186.pdf> (last access: 11.10.2024).
16. Barabino B., Deiana E. and Tilocca P. Measuring service quality in urban bus transport: a modified SERVQUAL approach. *International Journal of Quality and Service Sciences*. 2012. Vol. 4. No. 3. P. 238–252. URL: <https://doi.org/10.1108/17566691211269567> (last access: 11.10.2024).
17. Khudhair H., Alsadik S. & Khudhur A. Estimation of transportation service quality for selected groups of users using customer satisfaction index. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021. Vol. 9. No. 2. P. 325–332. URL: <https://doi.org/10.21533/pen.v9i2.1810> (last access: 11.10.2024).
18. U.S. Congressional Budget Office. Emissions of Carbon Dioxide in the Transportation Sector. URL: <https://www.cbo.gov/system/files/2022-12/58566-co2-emissions-transportation.pdf> (last access: 11.10.2024).
19. Abdel Wahed Ahmed M. M., Abd El Monem N. Sustainable and green transportation for better quality of life case study greater Cairo – Egypt. 2020. *House and Building Research Center Journal*. No. 16 (1). P. 17–37. URL: <https://doi.org/10.1080/16874048.2020.1719340> (last access: 11.10.2024).
20. Anderson R., Condry B., Findlay N., Brage-Ardao R., Li H. Measuring and Valuing Convenience and Service Quality. A review of global practices and challenges from the public transport sector. Discussion Paper No. 2013-16. URL: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/dp201316.pdf> (last access: 11.10.2024).
21. Eboli L., Mazzulla G. Performance indicators for an objective measure of public transport service quality. *European Transport / Trasporti Europei*. 2012. No. 51. P. 1–21. URL: <https://www.openstarts.units.it/server/api/core/bitstreams/19aa2bb3-6cb7-43db-9ae3-a81b6a660a9c/content> (last access: 11.10.2024).
22. Sharma H. How short or long should be a questionnaire for any research? Researchers dilemma in deciding the appropriate questionnaire length. *Saudi Journal of Anaesthesia*. 2022. No. 16 (1). P. 65–68. URL: https://doi.org/10.4103/sja.sja_163_21 (last access: 11.10.2024).
23. How many questions should be asked in a survey? URL: <https://www.netigate.net/articles/survey-tips/how-many-questions-survey/> (last access: 11.10.2024).
24. Підготовка фахівців з освітніх вимірювань в Україні / О. В. Авраменко, Ю. О. Ковальчук, В. П. Сергієнко та ін. Ніжин: ПП «Лисенко М. М.», 2012. Ч. 2. 398 с. URL: https://moodle.ndu.edu.ua/pluginfile.php/889/mod_page/content/1/Pidgotovka_fahivtsiv_part_2.pdf (дата звернення: 11.10.2024).
25. Cronbach L. J. Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*. 1951. No. 16. P. 297–334. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02310555> (last access: 11.10.2024).
26. The Correlation Coefficient (r). URL: <https://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/MPH-Modules/PH717-QuantCore/PH717-Module9-Correlation-Regression/PH717-Module9-Correlation-Regression4.html> (last access: 11.10.2024).
27. Шостак І. В. Анкетування: методичні рекомендації щодо організації та проведення соціологічного дослідження / Нац. ун-т «Острозька академія». Острог, 2021. 40 с.

URL: https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/8593/1/Anketuwania_metodyczka.pdf (дата звернення: 11.10.2024).

Копитков Денис Михайлович, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0001-7861-4836. Тел.: +38 (057) 707-32-61. E-mail: kopytkov_dm@ukr.net.

Самчук Ганна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-9890-6374. Тел.: +38 (057) 707-32-61. E-mail: ganna.samchuk@gmail.com.

Черепакха Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, асистент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0009-0004-6129-1945. Тел.: +38 (057) 707-37-20. E-mail: stt_0014@ukr.net.

Kopytkov Denys, PhD (Ped). Associate Professor, department of transport systems and logistics, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-7861-4836. Tel.: +38 (057) 707-32-61. E-mail: kopytkov_dm@ukr.net.

Samchuk Ganna, PhD (Tech.). Associate Professor, department of transport systems and logistics, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-9890-6374. Tel.: +38 (057) 707-32-61. E-mail: ganna.samchuk@gmail.com.

Cherepakha Oleksandr, PhD (Tech). Assistant Professor, department of transport technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0009-0004-6129-1945. Tel.: +38 (057) 707-37-20. E-mail: stt_0014@ukr.net.

Статтю прийнято 29.10.2024 р.

УДК 656.6:629.067

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МОРСЬКИХ БЕЗПЛОТНИХ АПАРАТІВ У ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Доктори техн. наук О. М. Мельник, О. А. Онищенко, д-р філос. С. В. Курдюк, молод. наук. співроб. Т. К. Гаврилюк, старш. викл. Д. А. Бурлаченко

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY AND PROSPECTS OF APPLICATION OF UNMANNED MARITIME VEHICLES IN LOGISTICS SYSTEMS

Sc. D. (Eng) O. M. Melnyk, O. A. Onyshchenko, Ph.D. S. V. Kurdiuk, Jun. Res. T. K. Havryliuk, Sen. Lecturer D. A. Burlachenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320844>

Анотація. Безпілотні технології відіграють ключову роль в забезпеченні, доставленні вантажів і моніторингу морського середовища, однак їх широке впровадження стикається зі значними викликами, зокрема нестабільністю енергетичного забезпечення, обмеженою автономністю і складністю маршрутизації. У статті розглянуто ключові аспекти використання морських безпілотних апаратів (МБПА) у логістичних системах, включаючи їхні переваги, виклики та перспективи розвитку. Основну увагу приділено потенціалу морських дронів у різних сферах: доставленні вантажів, моніторингу інфраструктури, екологічному контролю та участі в рятувальних операціях. Важливим аспектом роботи є запропонована спрощена математична модель оптимізації маршрутів, що дає змогу

мінімізувати витрати на доставлення та підвищити ефективність логістичних систем. Проаналізовано сучасні технології, пов'язані з автономністю дронів, їхньою інтеграцією з інтелектуальними системами, а також роль у розумних логістичних мережах. Значну увагу приділено питанням енергоефективності та впливу МБПА на зменшення екологічного сліду. Висвітлено також виклики впровадження дронів, зокрема відсутність міжнародних регламентів, вимоги до кібербезпеки та обмеження щодо технічних можливостей. На основі аналізу практик успішного використання в судноплавних підкреслено ефективність дронів у скороченні витрат і підвищенні точності операцій. Запропоновано подальші перспективи вдосконалення автономності безпілотних апаратів, розроблення мережесих рішень для групового управління та інтеграції з портовою інфраструктурою. Результати дослідження підкреслюють необхідність встановлення міжнародних стандартів і нормативів для забезпечення та екологічності, а також розвиток енергоефективних рішень для створення фундаменту глибокої інтеграції МБПА у глобальні логістичні системи.

Ключові слова: безпілотні апарати, логістичні системи, оптимізація маршрутів, енергоефективність, автономні системи, морські дрони, морський транспорт, інтелектуальні системи, екологічний контроль, рятувальні операції, моніторинг інфраструктури, морські перевезення.

Abstract. *Unmanned technologies play a key role in ensuring security, cargo delivery and monitoring of the marine environment, but their widespread adoption faces significant challenges, including unstable power supply, limited autonomy and complexity of routing. The article discusses the key aspects of the use of marine unmanned aerial vehicles (MAVs) in logistics systems, including their advantages, challenges, and development prospects. The focus is on the potential of maritime drones in various areas: cargo delivery, infrastructure monitoring, environmental control, and participation in rescue operations. An important aspect of the work is the proposed simplified mathematical model of route optimization, which minimizes delivery costs and increases the efficiency of logistics systems. Modern technologies related to the autonomy of drones, their integration with intelligent systems, and their role in smart logistics networks are analyzed. Considerable attention is paid to energy efficiency and the impact of UAS on reducing the ecological footprint. The challenges of introducing drones, including the lack of international regulations, cybersecurity requirements, and technical limitations, are also highlighted. Based on the analysis of successful practices in the shipping industry, the effectiveness of drones in reducing costs and increasing the accuracy of operations is emphasized. Further prospects for improving the autonomy of unmanned vehicles, developing network solutions for group management and integration with port infrastructure are proposed. The results of the study emphasize the need to establish international standards and regulations to ensure safety and environmental friendliness, as well as the development of energy-efficient solutions to create the foundation for deep integration of UAS into global logistics systems.*

Keywords: *unmanned aerial vehicles, logistics systems, route optimization, energy efficiency, autonomous systems, maritime drones, maritime transport, intelligent systems, environmental control, rescue operations, infrastructure monitoring, maritime transportation.*

Вступ. Безпілотні технології стали невід'ємною складовою сучасної логістики, надаючи рішення для оптимізації транспортування, моніторингу та управління запасами. Незважаючи на те, що з моменту своєї появи безпілотні апарати

(БПА) використовували переважно у військових цілях, в останні роки вони знайшли також застосування і в комерційному та цивільному секторах. Сьогодні повітряні, наземні та морські дрони активно впроваджують для

автоматизації доставлення, інвентаризації та контролю інфраструктури, відкриваючи нові горизонти для підвищення ефективності ланцюжків поставок.

Що стосується морських дронів, то вони займають особливе місце в цій еволюції. На відміну від повітряних і наземних безпілотних апаратів, вони призначені для роботи в унікальних умовах – на поверхні води або під водою. Їх застосування дає змогу вирішити широкий спектр завдань, включно з доставленням вантажів між портами, моніторингом морської інфраструктури, екологічним контролем і участю в рятувальних операціях. Морські дрони вже сьогодні дають логістичним компаніям змогу розширити зону дії, знизити витрати на транспортування і підвищити безпеку операцій, мінімізуючи при цьому втручання людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження підкреслюють різноманіття застосування безпілотників у логістиці як із повітряними, так і морськими дронами. Деякі дослідження демонструють, що безпілотні апарати стали важливою складовою операцій «останньої милі», даючи змогу значно скоротити час доставлення і поліпшити доступність товарів у важкодоступних районах. У зв'язку з цим системи управління безпілотними апаратами вже активно впроваджують у логістичних ланцюжках провідних компаній [1, 4, 7]. У морській логістиці безпілотники застосовують для моніторингу за суднами, портами і об'єктами морської інфраструктури. Вони відіграють головну роль у забезпеченні екологічного контролю та запобіганні забрудненням, а також беруть участь у рятувальних операціях. Наприклад, використання дронів для інспекції морських об'єктів і моніторингу викидів значно покращує їхню безпеку і знижує експлуатаційні витрати [6, 8, 11].

Безекіпажні технології активно інтегрують у розумні логістичні рішення,

такі як автономні порти і системи цифрового моніторингу. Дрони сприяють підвищенню оперативної готовності морських і наземних систем завдяки їхній здатності надавати дані в режимі реального часу [3, 9]. Однак упровадження цих технологій пов'язане з низкою викликів: регулюванням, кібербезпекою та розвитком інфраструктури [2, 12].

Ефективність безпілотних апаратів у логістиці зростає завдяки розробленню алгоритмів маршрутизації та поліпшенню автономних систем управління. Ці інновації підтримані дослідженнями в галузі сталого транспорту, де дрони допомагають знизити вуглецевий слід і поліпшити екологічну безпеку операцій [5, 10]. У роботах [13-15] висвітлено розвиток дистанційних комп'ютерних технологій і систем управління автономними суднами, зокрема розроблення математичних моделей для забезпечення їхньої безпечної навігації, проаналізовано методи виявлення автономних об'єктів на водній поверхні.

Незважаючи на те, що безпілотні технології стали невід'ємною складовою логістичних і транспортних систем, їхнє масове впровадження стикається з низкою значних проблем. З одного боку, морські дрони мають величезний потенціал для оптимізації доставлення вантажів, моніторингу інфраструктури та екологічного контролю, з іншого – існує безліч бар'єрів, як-от відсутність чітких міжнародних регламентів, обмежені технічні можливості (вантажопідйомність, автономність), високі вимоги до кібербезпеки та складності інтеграції в наявні логістичні ланцюжки. Ці виклики обмежують ефективність і масштабованість застосування морських дронів у логістиці, що потребує подальшого аналізу та опрацювання.

Мета та завдання дослідження. Мета статті – аналіз можливостей і перспектив застосування морських дронів у логістиці, виявлення головних переваг і обмежень, а також визначення шляхів їхнього

ефективного інтегрування в наявні логістичні системи. Завдання – дослідити сучасні напрями застосування морських дронів, розробити спрощену математичну модель оптимізації маршрутів, що дає змогу мінімізувати витрати на доставлення та скоротити час перевезення; проаналізувати сучасні технологічні рішення для підвищення автономності та енергоефективності морських дронів; визначити виклики, пов’язані з використанням морських дронів, включаючи регуляторні, технічні та екологічні аспекти.

Основна частина дослідження.

Морські безпілотні апарати (МБПА) завдяки своїм технічним характеристикам і автономності застосовувані в деяких напрямках логістики, оптимізуючи процеси доставлення, моніторингу та управління інфраструктурою.

Один із найперспективніших напрямів – доставлення вантажів, особливо на «останній милі», що стосується транспортування невеликих партій вантажів на фінальному етапі маршруту до кінцевого споживача, що особливо важливо для важкодоступних районів, островів або офшорних платформ. Це дає змогу значно скоротити час і витрати, пов’язані з традиційними методами доставлення, як-от використання сервісних суден або вертольотів. Наприклад, в екстрених випадках саме морські дрони можуть у стислий термін доставити медичні

препарати або запчастини, які потребують оперативного доставлення.

МБПА також відіграють головну роль в інспекції об’єктів морської інфраструктури: причалів, портів, судноплавних каналів і офшорних платформ. Завдяки сенсорам із високою роздільною здатністю і можливістю працювати в складних погодних умовах дрони можуть надавати дані про стан об’єктів у режимі реального часу, що допомагає скоротити витрати на технічне обслуговування, своєчасно виявляти пошкодження і запобігати аварійним ситуаціям.

МБПА використовують для моніторингу якості води та виявлення забруднень, збираючи дані про рівень токсичності, температуру та інші параметри, допомагаючи запобігати екологічним катастрофам, наприклад моніторинг розливів і вистежування витоків нафти або хімікатів, мінімізуючи шкоду для екосистеми.

У надзвичайних ситуаціях морські дрони забезпечують більш швидке реагування шляхом доставлення рятувальних засобів або забезпечення зв’язку з постраждалими до моменту прибуття основної команди рятувальників. Завдяки їхній маневреності та стійкості до складних умов дрони особливо корисні під час роботи в штормових умовах або зонах, не доступних для конвенційних суден (табл. 1).

Таблиця 1

Напрями використання МБПА в логістиці

Напрямок використання	Опис	Переваги
Доставлення вантажів	Перевезення невеликих партій вантажів між портами, островами або офшорними платформами для скорочення часу доставлення	Зменшення витрат і оперативне доставлення до важкодоступних районів
Моніторинг інфраструктури	Інспекція портів, причалів, судноплавних шляхів, каналів та інших об’єктів для оцінювання їхнього стану	Своєчасне виявлення пошкоджень і зменшення витрат на обслуговування

Екологічний контроль	Моніторинг якості води, виявлення забруднень, таких як витіки нафти або хімікатів	Захист екосистем і запобігання екологічним катастрофам
Рятувальні операції	Швидке реагування в надзвичайних ситуаціях: доставлення рятувальних засобів і підтримка зв'язку з постраждалими	Оперативна допомога у важкодоступних умовах, підвищення ефективності рятувальних робіт

Морські дрони продемонстрували значний потенціал в оптимізації логістичних і дослідницьких процесів. Нижче розглянуто успішні кейси компаній, інноваційні проєкти і їхнє наукове обґрунтування, що показують, як морські дрони змінюють традиційні підходи до логістики та морських операцій.

Наприклад, компанія Rolls-Royce розробляє автономні надводні судна, які мінімізують витрати на екіпаж і знижують екологічний вплив завдяки використанню енергозберігаючих технологій. Наукові дослідження компанії підтверджують, що використання безпілотних суден на 40 % знижує експлуатаційні витрати [1]. Автономні дрони Rolls-Royce застосовують для транспортування вантажів між портами і моніторингу судноплавних маршрутів, що демонструє високу точність і надійність.

Компанія XOcean використовує безпілотні системи для моніторингу морського середовища та інфраструктури. Ці апарати оснащені сенсорами з високою роздільною здатністю і здатні виконувати тривалі місії зі збору даних про стан води та підводних об'єктів. Наукові публікації свідчать, що дрони XOcean скорочують час на обстеження підводної інфраструктури на 50 % порівняно з традиційними методами [2].

Розробки ASV Global включають автономні системи для обстеження портів, офшорних платформ і підводних трубопроводів. Дослідження показують, що автономні апарати компанії дають змогу виконувати складні завдання з мінімальною участю людини, що особливо важливо в умовах складного рельєфу або високого рівня небезпеки [3]. Такі технології

знаходять застосування в нафтогазовій промисловості та портовій логістиці.

МБПА відіграють також ключову роль у розумних портах, забезпечуючи автоматизацію процесів розвантаження, моніторингу і транспортування вантажів. Деякі наукові дослідження показують, що автоматизація портової інфраструктури з використанням дронів підвищує продуктивність на 30 % і знижує вуглецеві викиди на 20 % [4].

Морські дрони, оснащені системами дистанційного зондування, застосовують для спостереження за льодовими умовами і визначення оптимальних маршрутів для суден. За дослідженнями, проведеними в рамках міжнародних програм, використання дронів в Арктиці дало змогу поліпшити точність картографування льодових маршрутів на 25 % [5].

В екологічних ініціативах морські дрони використовують для відстеження забруднень, таких як розливи нафти, і запобігання їхньому поширенню. Дослідження показують, що дрони можуть виявляти розливи нафти з точністю до 90 % на ранніх стадіях, що дає змогу знизити шкоду для екосистем [6].

Результати та обговорення. Для планування логістичних операцій із використанням дронів основним етапом є оптимізація маршруту, що мінімізує загальну відстань між складом і клієнтами. Це дає змогу знизити витрати на енергію, зменшити час доставлення та підвищити ефективність логістичної мережі.

Припустимо, що існує кількість N точок включно з центральним складом (початкова і кінцева точка маршруту) і $N - 1$ клієнтів.

Матриця відстаней: відомі відстані між усіма точками на маршруті c_{ij} , де c_{ij} – відстань між пунктами i і j .

Обмеження: кожного клієнта слід відвідати рівно один раз. Маршрут має починатися і закінчуватися на складі. Дрон має вибрати мінімальний маршрут для відвідування всіх точок.

Метою є мінімізація загальної довжини маршруту $\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij}$, де x_{ij} – бінарна змінна: 1, якщо маршрут проходить із точки i в j , і 0, якщо інакше.

Для розв'язання задачі використовують матрицю відстаней (морські милі) між складом і чотирма клієнтами, що визначає оптимальні маршрути доставки.

Дані, подані в табл. 2, отримані шляхом математичного моделювання з використанням алгоритмів оптимізації маршрутів для БПМА. В основі моделювання лежать реальні відстані між складом і клієнтами, розраховані на основі картографічних даних, параметрів водних маршрутів і стандартних навігаційних умов у регіоні.

Таблиця 2

Матриця відстаней між складом і клієнтами

	Склад	Клієнт 1	Клієнт 2	Клієнт 3	Клієнт 4
Склад	0	10	15	20	25
Клієнт 1	10	0	35	25	30
Клієнт 2	15	35	0	30	20
Клієнт 3	20	25	30	0	15
Клієнт 4	25	30	20	15	0

Розв'яжемо задачу комівояжера, де змінні x_{ij} визначають, чи включено шлях із i в j до маршруту. Обмеження усувають

підцикли, щоб маршрут охоплював усі точки рівно один раз.

Цільова функція

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

за таких обмежень:

1) кожна точка є початковою і кінцевою одного маршруту:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, \quad \sum_{i=1}^N x_{ij} = 1, \quad \forall i, j \tag{2}$$

2) усунення підциклів (метод Міллера-Таккера-Земліна):

$$u[i] - u[j] + N \cdot x[i, j] \leq N - 1, \quad \forall i, j, i \neq j \tag{3}$$

де $u[i]$ – допоміжна змінна, що являє собою порядок відвідування точки i ;
 N – загальна кількість точок.

Виконаємо розрахунок оптимального маршруту, мінімізуючи загальну відстань між складом і клієнтами. Для розв'язання задачі використовуватимемо метод математичного програмування з усуненням підциклів, відомий як метод Міллера-Таккера-Земліна.

Результатом розрахунків є оптимальний маршрут із мінімальними витратами (рис. 1), на якому показано склад і мережу клієнтів у вигляді вузлів, а відстані між ними позначено ребрами, що показують можливі маршрути із зазначенням відстаней між точками.

Схема маршрутів доставлення між центральним складом і клієнтами відображує особливості логістичної мережі, де кожен вузол графа відповідає певному пункту, а стрілки між вузлами позначають можливі шляхи доставлення. Над стрілками вказані відстані (у морських милях), які відображують логістичні витрати у вигляді подоланих відстаней між пунктами. Центральний склад виконує роль початкової та завершальної точки маршруту.

Такий підхід дає змогу планувати доставлення в такий спосіб, щоб дрон завжди повертався на базу після виконання своїх завдань. Клієнти 1, 2, 3 і 4 – точки доставлення, які дрон має обслуговувати. Кожен клієнт має прямий зв'язок зі складом та іншими клієнтами, що забезпечує можливість різних варіантів побудови маршрутів. Відстані між пунктами є важливим показником для оптимізації маршруту. Наприклад, відстань між складом і Клієнтом 1 становить 10 миль, тоді як відстань до Клієнта 4 — 25 миль. Найменша відстань між клієнтами — 15 миль, що спостерігається між Клієнтом 3 і Клієнтом 4. Таку інформацію використовують для скорочення загальної довжини маршруту. Зв'язок між пунктами подано у вигляді повного графа, де кожен клієнт зв'язаний не лише зі складом, а й з іншими клієнтами. Така структура дає змогу вибрати найбільш оптимальний маршрут серед усіх можливих варіантів.

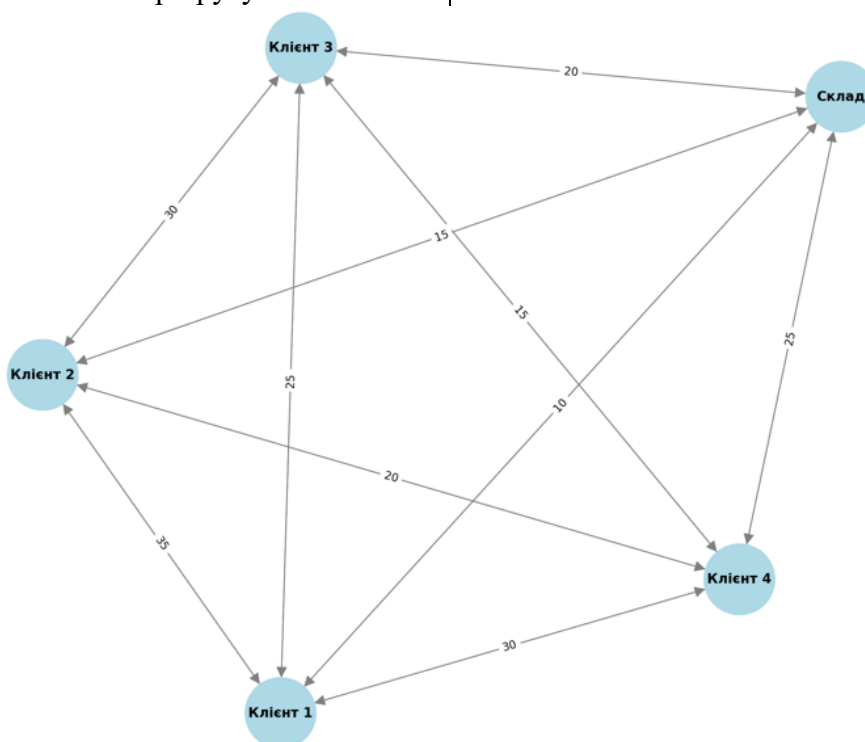


Рис. 1. Схема маршрутів доставлення між складом і клієнтами

Таку схему можна використовувати для аналізу можливих маршрутів і вибору оптимального шляху для доставлення. Вона дає змогу мінімізувати загальну відстань маршруту, що важливо для економії енергії дронів, скоротити час доставлення, особливо в умовах термінових логістичних завдань, і визначити ефективність маршрутів залежно від поставлених завдань, наприклад забезпечення швидкого доставлення, обслуговування

найвіддаленіших клієнтів або максимальна економія ресурсів.

Ступені ефективності маршрутів (табл. 3) розраховані за допомогою математичних оптимізаційних моделей, які враховують такі параметри: загальна відстань маршруту, споживання енергії дроном і час доставлення. Кожен тип маршруту оцінено щодо енергетичних і часових витрат, а також його відповідності логістичним цілям, таким як швидкість доставлення або економія ресурсів.

Таблиця 3

Використання маршрутів дронів у логістиці

Тип маршруту	Ефективність, %	Опис
Оптимальний маршрут	95	Максимальна ефективність завдяки мінімізації відстані та витрат
Довший маршрут	80	Знижена ефективність через додаткові витрати часу і палива
Короткий маршрут	90	Забезпечує значну економію ресурсів, але менш ефективний, ніж оптимальний
Маршрут із випадковим вибором	60	Найнижча ефективність через нерегулярне планування та зайві витрати

На рис. 2 зображено ефективність різних типів маршрутів, використовуваних для логістики дронів:

- оптимальний маршрут (95 %) забезпечує найвищу ефективність: завдяки ретельному плануванню маршруту мінімізовано витрати на паливо та час доставлення, що особливо важливо для дронів з обмеженим запасом енергії;

- для довшого маршруту (80 %) характерні додаткові витрати через збільшену тривалість доставлення. Такий тип можна використовувати у випадках, коли потрібно охопити значну кількість точок без особливої уваги до оптимізації;

- короткий маршрут (90 %) забезпечує добрий компроміс між економією ресурсів і оперативністю, але не враховує глобальної оптимізації;

- маршрут із випадковим вибором (60 %) має найнижчу ефективність через відсутність системного підходу до планування. Це призводить до перевитрат ресурсів і значного збільшення витрат на логістику.

Дані, подані на рис. 2, є візуалізацією ефективності різних маршрутів у відсотковому співвідношенні. Результати були отримані шляхом аналізу змодельованих логістичних операцій для різних умов доставлення.

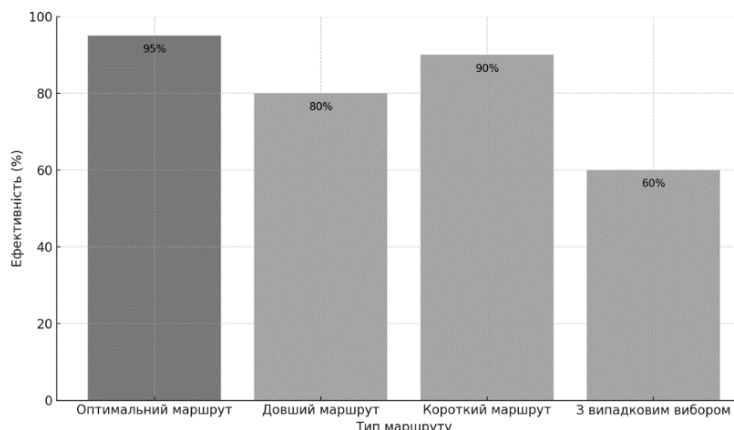


Рис. 2. Ступінь ефективності різних типів маршрутів

Проведений аналіз підкреслює важливість вибору оптимального алгоритму для оптимізації маршрутів дронів у логістиці, завдяки чому можна досягти максимального результату, скорочуючи витрати та підвищуючи швидкість доставлення, що у свою чергу є головним фактором успішної логістики «останньої милі».

МБПА продовжують еволюціонувати, стаючи важливим інструментом для оптимізації логістичних процесів, адже інтеграція морських дронів із системами штучного інтелекту (ШІ) та автоматизованими логістичними

платформами відкриє нові горизонти для їх використання, що дасть змогу (табл. 4):

- автоматично аналізувати маршрути й адаптувати їх у режимі реального часу залежно від погодних умов, завантаженості портів і потреб клієнтів;
- використовувати технології комп'ютерного моніторингу, датчики для спостереження за станом вантажів і об'єктами морської інфраструктури;
- створювати повністю автономні мережі морських дронів, які самостійно координуватимуть доставлення та обмін даними.

Таблиця 4

Переваги використання МБПА

Переваги	Опис
Автономність і стійкість до погодних умов	Морські дрони здатні працювати автономно без втручання людини та ефективно виконувати завдання у складних погодних умовах, таких як шторми, сильний вітер чи опади
Зменшення операційних витрат	Використання дронів значно зменшує витрати на персонал, паливо і технічне обслуговування порівняно з традиційними суднами
Екологічність і безпека	Морські дрони працюють на електроенергії або альтернативних джерелах енергії, що робить їх екологічно чистими та мінімізує ризики для екіпажу в небезпечних умовах

Зі збільшенням популярності МБПА дедалі гостріше відчувається необхідність уніфікації міжнародних правил їх

використання. Без чітко встановлених стандартів зростає ризик зіткнень з іншими суднами, що робить важливим забезпечення

безпеки навігації. Також потрібно більше уваги приділяти екологічним аспектам, щоб мінімізувати шкоду морським екосистемам, наприклад, через використання екологічно чистих технологій. Крім того, необхідно створити юридичну базу, яка регулює перетин територіальних вод, захист даних і забезпечення конфіденційності, що дасть змогу ефективно управляти використанням дронів у глобальних логістичних мережах.

Морські безпілотні літальні апарати (БПЛА) мають значний потенціал для зменшення впливу на навколишнє середовище.

Використовуючи електродвигуни або альтернативні джерела енергії, такі як сонячні батареї, вони допомагають зменшити викиди парникових газів і шумове забруднення. Екологічна ефективність АБПА також проявляється в можливості точного моніторингу викидів і збору даних про стан водних екосистем, щоб швидко реагувати на загрози забруднення.

Незважаючи на значний прогрес у розвитку МБПА, залишаються напрями, які потребують подальших досліджень і вдосконалення. Одним із головних завдань є підвищення енергоефективності, що дасть змогу збільшити дальність рейсів і знизити споживання ресурсів, особливо під час використання поновлюваних джерел енергії. Також необхідні більш досконалі мережеві рішення для створення систем, здатних координувати роботу груп дронів у складних завданнях, як-от моніторинг, розвідка або рятувальні операції. Важливим напрямом залишається інтеграція морських дронів у глобальні логістичні мережі, що передбачає розроблення алгоритмів, які забезпечують ефективну взаємодію з портовою інфраструктурою і традиційним морським транспортом, що сприяє створенню єдиної і високоефективної морської транспортної системи.

Майбутнє МБПА пов'язане з їхньою глибокою інтеграцією в розумні логістичні системи, що створить можливості для повністю автономного доставлення вантажів. Однак для успішного впровадження технологій необхідний розвиток міжнародних стандартів і нормативів, а також проведення досліджень у сфері енергоефективності та мережевих рішень. Інвестування в ці напрями стане головним фактором для подальшого зростання та інноваційного розвитку логістики з використанням морських дронів.

Висновки. У статті детально проаналізовано використання морських дронів у логістиці, зокрема їхню роль в оптимізації поставок, моніторингу інфраструктури та проведенні рятувальних операцій. На основі математичних моделей були розраховані оптимальні маршрути безпілотних апаратів, що дає змогу мінімізувати витрати на доставлення та підвищити ефективність логістичних процесів. Досліджено аспекти планування маршрутів і переваги впровадження таких технологій.

Дослідження показують, що інтеграція МБПА в логістичні мережі може скоротити споживання вичерпаного палива на 30 %, особливо під час операцій із доставлення «останньої милі». Такі екологічні переваги роблять їх важливим інструментом у досягненні цілей сталого розвитку морського транспорту.

Висвітлено перспективи розвитку морських дронів, включаючи їхню інтеграцію з інтелектуальними системами, використання нових джерел енергії та впровадження мережевих рішень для групового управління. Виділено важливість встановлення міжнародних стандартів і нормативно-правової бази, які забезпечать безпеку, екологічну відповідальність і ефективність безпілотних технологій.

Список використаних джерел

1. Jahani H., Khosravi Y., Kargar B., Ong K. L., & Arisian S. (2024). Exploring the role of drones and UAVs in logistics and supply chain management: A novel text-based literature review. *Journal of Cleaner Production*, 413(3), 134893. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.134893>.
 2. Frederiksen M. H., & Knudsen M. P. (2018). Drones for offshore and maritime missions: Opportunities and barriers. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 96(1), 245–259. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104259>.
 3. Ichimura Y., Dalaklis D., Kitada M., & Christodoulou A. (2022). Shipping in the era of digitalization: Mapping the future strategic plans of major maritime commercial actors. *Digital Business*, 4(2), 102–118. <https://doi.org/10.1016/j.digbus.2022.100023>.
 4. Di Paolo L. (2018). Applications of drones in logistics: A literature review. *Logistics and Supply Chain Review*, 22(4), 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.lscr.2018.11.001>.
 5. Fanariotis A., Karachalios T., Moschos P., & Giannopoulos G. (2023). Evaluation of contemporary UAV-based measurement techniques for gas emissions monitoring. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 14(3), 23–45. <https://doi.org/10.1145/3635059.3635100>.
 6. Wang J., Li H., Yang Z., Zhou K., & Xing W. (2023). Applications, evolutions, and challenges of drones in maritime transport. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), Article 2056. <https://doi.org/10.3390/jmse11112056>.
 7. Benarbia T., & Kyamakya K. (2021). A literature review of drone-based package delivery logistics systems and their implementation feasibility. *Sustainability*, 14(1), Article 360. <https://doi.org/10.3390/su14010360>.
 8. Forti N., d'Afflisio E., Braca P., & Millefiori L. M. (2022). Next-gen intelligent situational awareness systems for maritime surveillance and autonomous navigation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(3), 2947–2956. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3158462>.
 9. Askarzadeh T., Bridgelall R., & Tolliver D. (2024). Monitoring nodal transportation assets with uncrewed aerial vehicles: A comprehensive review. *Drones*, 8(6), Article 233. <https://doi.org/10.3390/drones8060233>.
 10. Song B. D., Park K., & Kim J. (2018). Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 119(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.002>.
 11. Argüello G. (2023). Smart port state enforcement through UAVs: New horizons for the prevention of ship source marine pollution. In *Smart Ports and Robotic Systems* (pp. 294–309). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25296-9_11.
 12. Thompson M., & Davies M. (2021). Maritime uses of drones. In *Drone Law and Policy* (pp. 123–135). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9781003028031-7>.
 13. Melnyk O., Volianska Ya., Onishchenko O., Onyshchenko S., Kononova O., Vasalatii N. (2022). Development of Computer-based Remote Technologies and Course Control Systems for Autonomous Surface Ships. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 22 (09), 183-188. DOI:<https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.9.27>.
 14. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Voloshyn A., Kalinichenko Y., Rossomakha O., Naleva G., Rossomakha O. (2022). Autonomous Ships Concept and Mathematical Models Application in their Steering Process Control. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 16, No. 3. P. 553-559. doi:10.12716/1001.16.03.18.
 15. Stetsenko M., Melnyk O., Vorokhobin I., Korban D., Onishchenko O., Ternovsky V., & Ivanova I. (2024). Polarization-based target detection approach to enhance small surface object identification ensuring navigation safety. *System Research and Information Technologies*, 2024(2), 35–51. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2024.2.03>.
-
-

Мельник Олексій Миколайович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Онищенко Олег Анатольович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління судном, Національний Університет «Одеська Морська Академія», Одеса, Україна. ORCID: 0000-0002-3766-3188.

Курдюк Сергій Вікторович, доктор філософії, старший науковий співробітник, Національний Університет «Одеська Морська Академія», Одеса, Україна. ORCID: 0000-0002-3165-4571.

Гаврилюк Тимофій Костянтинович, молодший науковий співробітник, Національний Університет «Одеська Морська Академія», Одеса, Україна. ORCID: 0009-0006-8732-8958.

Бурлаченко Дементій Анатольович, старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID ID: 0000-0003-3749-4908.

Melnyk Oleksiy, Sc.D., Assoc. Prof., Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Onishchenko Oleg, Sc.D., Professor, Professor of the Department of Ship Handling, National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0002-3766-3188.

Kurdiuk Serhii, PhD, Senior Researcher, National University «Odesa Maritime Academy». Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0002-3165-4571.

Gavrylyuk Tymofiy, Junior Researcher, National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, Ukraine. ORCID: 0009-0006-8732-8958.

Burlachenko Dementiy, Senior Lecturer, Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID ID: 0000-0003-3749-4908.

Статтю прийнято 01.12.2024 р.

УДК 656.223: 658.75

ФОРМУВАННЯ ТЕРМІНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ТОВАРІВ У РАЗІ ЇХ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗАЛІЗНИЦЕЮ

Д-р техн. наук Д. В. Ломотько, канд. техн. наук В. М. Ільчишин,
д-р філос. М. Д. Ломотько, асп. Д. В. Кудряшов

FORMATION A TERMINAL SYSTEM FOR DISTRIBUTION OF GOODS WHEN TRANSPORTED BY RAILWAY

Dr. Sc. (Tech.) D. V. Lomotko, Cand. Tech. Sc. V. M. Ilchyshyn,
PhD M. D. Lomotko, Postgraduate Student D. V. Kudryashov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320854>

Анотація. Запропоновано в основу автоматизованої системи розподілу замовлень на перевезення товарів покласти логістичні ланцюги між постачальником і отримувачем. Встановлено, що за сучасних умов в Україні особливістю такого ланцюга є відсутність інформаційного зв'язку між постачальником і отримувачем, а попередніх фінансових потоків

може бути взагалі не передбачено. Ця принципова відмінність автоматизованої системи розподілу замовлень на перевезення вантажів за участю залізниць вплинула на перелік завдань і структуру запропонованої системи з елементами інтелектуальної підтримки ухвалення рішень. Прикладна цінність отриманих результатів полягає в їх пристосуванні до складних умов нашої країни, яка перебуває у стані війни.

Ключові слова: автоматизована система, розподіл вантажів, інформаційне забезпечення, розподільчий термінал, залізничні перевезення.

Abstract. It is proposed to base the automated system for distributing orders for the transportation of goods on the basis of logistics chains between the supplier and the recipient. It is established that in modern conditions of Ukraine, the peculiarity of such a chain is the lack of information communication between the supplier and the recipient, and previous financial flows may not be provided at all. This is a fundamental difference of the automated system for distributing orders for the transportation of goods with the participation of railways, which influenced the list of tasks and the structure of the proposed system with elements of intellectual support for decision-making.

The basis of the molding is an automated system for supporting the adoption of logistics solutions for the distribution of goods (ASPR) when transported goods are accepted by logistics postmasters - separate terminals - pick-ups. Possible methods and standard types of similar automated systems have been analyzed. It has been established that the usefulness of such a lancet is the practicality of the direct information connection between the postal operator and the returner; the return connection can only be realized for a fee information flows to a separate terminal.

The directions are molded by ASPRT as a sophisticated system with elements of intelligent decision-making by the personnel of the distribution terminal. Decisions about the nature of the division are to be taken as a result of a formalized optimization task to ensure the level of corollary effect of the use of goods as a material resource for a co-worker. The practical value of obtaining the results lies with the creators of the ASPRT when transporting goods through the warehouse, where the separate terminal plays a central role in the logistics relationship between the postal operator and the transporter who transports Their quick adaptation to the modern minds in which our country lives. The applied value of the obtained results lies in their adaptation to the modern difficult conditions of our country, which is in a state of war.

Key words: automated system, cargo distribution, information support, distribution terminal, railway transportation.

Вступ. Сучасні умови ставлять нові складні завдання перед структурами, що виконують для економіки країни логістичні функції постачання та розподілу замовлень на перевезення матеріальних ресурсів. Завдання організації процесу розподілу товарів є складним для автоматизації, оскільки потребує врахування багатьох факторів, що істотно впливають на ці процеси і їхні технічні і якісні показники.

Світовий досвід показує, що ефективні системи доставлення вантажів базовані на врахуванні особливостей використання логістичних технологій у відповідних ланцюгах постачання та ефективному

попередньому етапі розподілу заявок на перевезення. Подібні системи спрямовані на автоматизацію процесів управління матеріальними та інформаційними потоками на шляху прямування від виробників до споживачів.

Сучасною тенденцією є той факт, що інформаційне забезпечення у процесі перевезення і розподілу товарів повинно мати не тільки традиційні функції таких систем, але й забезпечувати по можливості реалізацію логістичних підходів «точно у строк» з елементами інтелектуального оцінювання результатів виконання розподілу матеріального ресурсу. Це

особливо важливо для систем розподілу, у яких вантажний розподільчий термінал відіграє головну роль у логістичному ланцюжку забезпечення між постачальником і одержувачем.

Постановка проблеми. Роль складського терміналу з кожним роком стає все більш значущою у виробничому циклі будь-якої установи. Уже традиційні для умов ринку та принципово нові виклики, з якими стикається наша держава сьогодні, додали своїх особливостей до формування систем постачання і розподілу матеріальних ресурсів. Актуальним зараз стає завдання створення систем розподілу масових товарів і гуманітарної допомоги, де роль терміналу висока, адже він відіграє головну роль у логістичному ланцюзі між постачальником і одержувачем.

«Вантаж – матеріальні цінності, які перевозять залізничним транспортом у спеціально призначеному для цього вантажному рухомому складі» [1]. Ці особливості, вочевидь, має враховувати пропонована термінальна автоматизована система підтримки ухвалення логістичних рішень щодо розподілу товарів (АСПРТ), яку розглянуто на прикладі транспортування вантажів за участю залізниці.

Метою роботи є дослідження сучасних аналогів АСПРТ, аналіз факторів, що впливають на процеси автоматизованого

управління та розподілу товарів на прикладі доставлення залізницею. Об'єктом дослідження є АСПРТ на прикладі залізничного транспорту з елементами СППР. Предметом дослідження є сукупність автоматизованих систем і систем управління базами даних для організації управління, а також постачальники, отримувачі, термінали як суб'єкти розподілу матеріального ресурсу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні дослідження базовані на формуванні ефективних класичних каналів розподілу від дилерів і дистриб'юторів до споживача, які необхідно формалізувати. Доведено, що проблема удосконалення системи доставлення продукції залізничним транспортом має бути базована на формуванні ефективних каналів розподілу, що є однією з основних проблем автоматизації такої діяльності підприємства [2].

Виявлення основних варіантів інформаційного обміну в логістичних каналах розподілу [3] має враховувати кількість, можливі типи та ролі учасників, їхній статус і пріоритети в обслуговуванні [4]. З цих причин традиційно процес створення АСПРТ починається з етапів формування карти матеріальних і супутніх інформаційних потоків. Зокрема, аналітичний підхід передбачає створення клієнт-орієнтованої системи [5] (рис. 1).

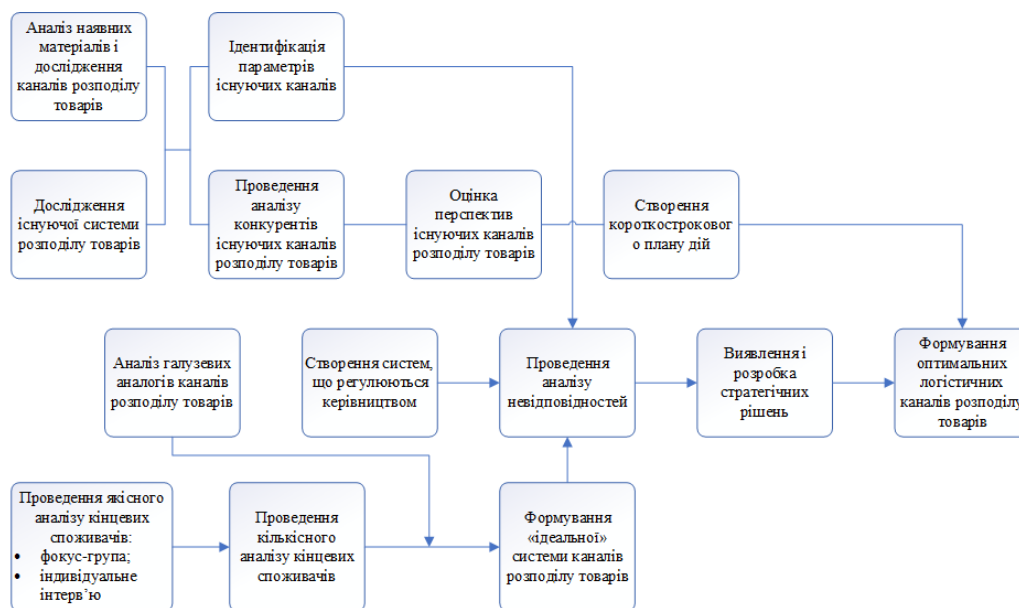


Рис. 1. Структурна схема аналітичного підходу для розроблення традиційних клієнт-орієнтованих систем розподілу товарів

Сучасні АСПРТ можуть використовувати різні процедури та математичне забезпечення. У роботі [6] досліджено роль блокчейну в зменшенні впливу перешкод для управління ланцюгом поставок (SCM) за допомогою переваг блокчейну в системах ухвалення рішень. Результати цього дослідження свідчать про те, що міжорганізаційні перешкоди у формуванні АСПРТ є найбільш прийнятними, вплив яких блокчейн може пом'якшити.

Проблеми формування АСПРТ для гуманітарної допомоги особливо актуальні для дослідження ланцюга поставок SCM під час і після спалахів пандемії COVID-19, введення воєнного стану або під час стихійних лих. У дослідженнях [7, 8] наведений змістовий огляд найкращих джерел про статті SCM. Автори вирішили три основні цілі: дослідити документи, публіковані у сфері гуманітарної логістики та ланцюга поставок; визначили особливості в гуманітарній логістиці та ланцюгу поставок, критичний огляд досліджень, опублікованих стосовно HSC до, під час і після пандемії COVID-19.

У статті [9] досліджено взаємозв'язки між корпоративною соціальною відповідальністю і краудфандингом у контексті операцій із ліквідації наслідків стихійних лих за формування SCM. Автори дослідити, як якість інформації пом'якшує взаємозв'язок системи постачання товарів, зокрема гуманітарної допомоги, і краудфандингу для досягнення фінансової та соціальної стабільності. Дослідження також стосується таких факторів, як тип стихійного лиха, розмір фірми-постачальника та сектор, до якого належать ці фірми, а також можливі наслідки лиха. На жаль, дослідження не має прикладного результату про перевезення залізничним транспортом.

Технологія індустрії 4.0 для логістичних процесів отримала назву Logistics 4.0. Дослідження [10, 11] мають на меті створити концепт моделі АСПРТ, а також основу архітектури її побудови на елементах концепції Logistics 4.0 у виробничих компаніях. Дослідження засноване на емпіричних даних в індійському контексті, що відбиває його певні особливості. Інший підхід запропонований у роботах [12, 14].

Концептуально в АСПРТ запропоновано формалізувати відносини між людиною і штучними автономними агентами в процесі ухвалення рішень про розподіл товару з точки зору агентної теорії та операційного менеджменту.

Необхідною умовою для створення та ефективного функціонування АСПРТ є організація своєчасної інформаційної підтримки всіх учасників процесу розподілу ресурсу. Такий підхід, притаманний логістичним принципам побудови системи розподілу, часто використовують у різних сферах економічної діяльності, зокрема на транспорті [14] і промислових підприємствах [15]. Наукові підходи для формування ефективних систем розподілу обмеженого ресурсу в цих роботах запропоновані на базі систем підтримки ухвалення рішень оперативного персоналу. По суті пропоновано розподілену систему управління базами даних, де технологічне рішення про розподіл ресурсу ухвалює оператор з урахуванням «підказки», формованої за правилами нечіткої логіки. Детально розглянуто проблему побудови автоматизованих систем на базі нечіткого і нейрон-нечіткого моделювання в роботі [16]. Матеріал заснований на нових результатах у цій галузі, проілюстрований численними прикладами. Такий підхід є сучасним трендом і може бути використаний для формування елементів системи підтримки ухвалення рішень у АСПРТ.

Проте програмна частина АСПРТ має забезпечувати мобільність і функціональність шляхом взаємодії з терміналами збору даних у режимі реального часу. Можливість доступу оператора до актуальної та достовірної інформації є дуже важливою в процесі розподілу товарів. Оснащеність таких сучасних пристроїв процесором, вбудованою пам'яттю, сканером і власною операційною системою дає змогу не тільки збирати інформацію про товари, а і вирішувати вагомі завдання обліку та контролю руху товару. Пристрої мають

кілька інтерфейсів передавання даних (Wi-Fi, Bluetooth, WLAN, Ethernet, GSM) із можливістю зчитування RFID-міток. Світовий досвід застосування деяких стандартів [3, 17] показує, що з використанням цих пристроїв можна перейти на вищий якісний рівень від традиційної АСПРТ до інтелектуальної системи з використанням елементів когнітивних технологій.

Основна частина. Розроблення спеціалізованих АСПРТ сьогодні постійно розширюється, функціонал систем управління стає все більш складним, у тому числі для вже наявних програмних продуктів. В основу АСПРТ запропоновано покласти систему управління терміналом, оскільки через специфіку товару, що розподіляють, саме термінал виступає єдиною ланкою, що зв'язує всі наявні інформаційні потоки. Проаналізувавши особливості функціонування АСПРТ, автори дійшли висновку про необхідність поєднання можливих наступних ідеологій побудови СППР, яка б забезпечувала ефективну організацію та своєчасну інформаційну підтримку всіх учасників процесу розподілу наявних ресурсів:

- облікова система управління (ОСУ) дає змогу автоматизувати процеси приймання та відвантаження товару, пересування товару на терміналі та звичайно використовується за невеликих обсягів матеріального ресурсу та інформації. Головна особливість – тільки фіксація рішення, яке ухвалює людина, а необхідної для користувача функціональності досягають написанням програмного коду. Недоліком такої системи є істотний вплив людського фактора, який є обмеженням для використання подібних систем на великих складах із великим потоком товарів. Іншою проблемою є те, що управлінські завдання ці системи майже не вирішують;

- Warehouse Management System. WMS-система забезпечує комплексний підхід для автоматизації процесів розподілу

ресурсу на терміналі. Ці системи засновані на автоматизації бізнес-процесів, тому легко інтегровані до систем управління підприємством (SAP, Oracle, 1C, Microsoft Dynamics) за стандартними протоколами обміну. Гнучкості системи досягають шляхом адаптації функціональності з налаштуванням системи та незначним дописуванням програмного коду. При цьому існує можливість виключення людського фактора з технологічного процесу, що дає змогу ухвалювати ефективні управлінські рішення з розміщення та сортування товару в терміналі. Це усуває можливі помилки, дає можливість виконання завдань із мінімальною кількістю переміщень і заданими пріоритетами, але потребує високоякісної підсистеми ідентифікації одиниць товару за всією номенклатурою;

- Enterprise Resource Planning System.

Використання ERP-систем дає змогу комплексно вирішити завдання автоматизації терміналу та передбачає можливість управління збутом і розподілом товару, тобто автоматизація може охоплювати всі ланки операцій із ним. ERP-системи часто застосовують як логістичні модулі глобальних систем. Перевагою є те, що вони дають змогу отримати будь-яку потрібну інформацію, а за рахунок високого ступеня розподілу системи надійні і стійкі. Недоліком є відносно висока вартість розроблення та впровадження цієї системи, крім того, вони зазвичай негнучкі, складні в налаштуванні та дуже ресурсовитратні;

- Supervisory Control And Data Acquisition. SCADA-ідеологію побудовано на принципах диспетчерського управління і збору даних. Система призначена забезпечити роботу в реальному часі систем збору, обробки, відображення і архівації інформації про об'єкт управління. Отже, SCADA-системи використовують у тих випадках, коли необхідно забезпечити контроль з боку оперативного працівника за технологічними процесами в реальному часі.

Основою АСПРТ за участю залізниці є певні логістичні ланцюги між постачальником і отримувачем. Особливістю такого ланцюга в умовах воєнного стану, на відміну від традиційної системи постачання та розподілу товарів, є те, що між постачальником і отримувачем можуть бути відсутні безпосередні цивільно-правові зв'язки – договори постачання. Як наслідок, між постачальником і отримувачем відсутня частка традиційних інформаційних потоків, а в процесі доставлення гуманітарної допомоги взагалі не передбачено фінансових потоків. Це є принциповою відмінністю АСПРТ від інших аналогічних, що істотно вплинуло на перелік завдань для запропонованої системи доставлення за участю залізниць.

Передбачено, що АСПРТ за участю залізниць має виконувати такі укрупнені функції:

- автоматизувати оперативний (щодобовий, щозмінний) облік товарів, що поступає, розподіл по терміналах, місцезнаходження матеріальних цінностей по місцях зберігання та видавання за кожним постачальником, отримувачем і видом номенклатури обліку;

- забезпечити достовірну інформацію про залишки товару на зберіганні та у процесі обробки на терміналі в розрізі партій (окремо з надходження та видавання);

- забезпечити оперативний контроль за дотриманням балансу кількості товару в терміналі за кожним видом номенклатури обліку відповідно до заздалегідь заданих критеріїв балансу з можливістю оперативного замовлення позицій, кількість одиниць яких нижче заданого рівня. В останньому випадку формування партії вантажу кожному отримувачу здійснюватиметься в порядку заздалегідь призначених пріоритетів, категорій (лікарні, дитячі заклади, установи харчування тощо) і необхідності залучення спеціалізованого рухомого складу (ізотермічні вагони, цистерни для перевезення газів під тиском тощо);

- забезпечити інформацію про планові терміни надходження партій товарів до розподільчого терміналу за кожним постачальником і видом номенклатури обліку;
- організувати контроль відповідності термінів надходження товарів, обробки і сортування в терміналі та можливого раннього терміну видавання отримувачам на підставі нормативного та прогнозного часу на виконання операцій;
- забезпечити комплектування партії вантажу на підставі замовлень отримувачів із наявних позицій номенклатури обліку з оцінюванням масогабаритних характеристик сформованої партії (для оцінювання витрат праці та необхідних характеристик автомобільного або залізничного рухомого складу);

- автоматизувати облік витрат на утримання товарів у терміналі.

Розроблення структури блоків інформаційного забезпечення АСПРТ на прикладі доставлення залізницею запропоновано виконати виходячи з даних про матеріальний потік, постачальника, отримувача (з пріоритетами в обслуговуванні або без них) і технологічних можливостей розподільчого терміналу. Структурну схему інформаційного забезпечення модуля розподілу замовлення та розподілу товарів за участю залізниці наведено на рис. 2. Цей підхід забезпечує комплексний та ефективний підхід для організації розподілу товарів у разі перевезення їх залізничним транспортом.

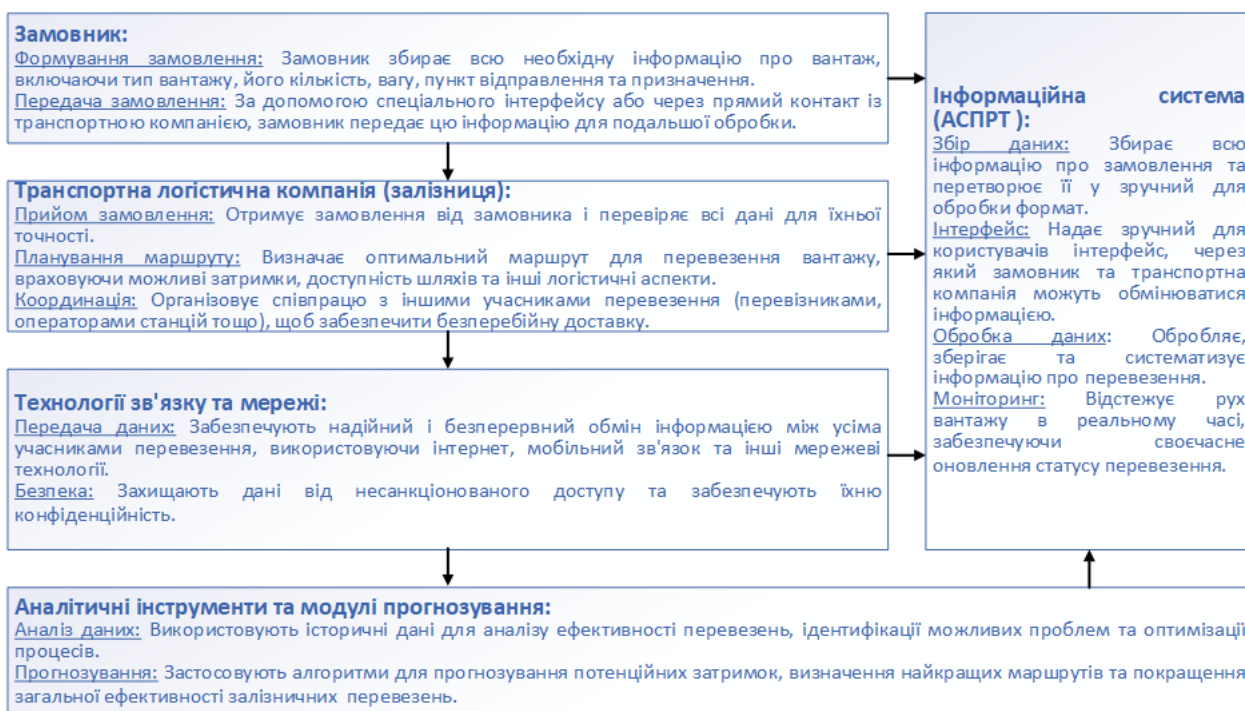


Рис. 2. Структурна схема інформаційного забезпечення замовлення товарів із доставленням за участю залізничного транспорту

Побудову АСПРТ з наявністю елементів інтелектуальної системи підтримки ухвалення рішення оперативним персоналом до розподілу обмеженої кількості товарів реалізовано шляхом урахування інтересів окремих суб'єктів –

постачальників, отримувачів і терміналів. Для них, як суб'єктів розподілу, необхідно оцінити ефективність використання ресурсу логістичного ланцюга з позиції отримання максимального результату отримувачем

У звичайних АСПРТ критерієм результативності зазвичай виступає прибуток, але, як зазначено вище, цей підхід не завжди можна застосувати в умовах воєнного стану, наприклад, для розподілу гуманітарної допомоги. У зв'язку з цим розглянемо постановку оптимізаційної задачі розподілу обмеженого ресурсу за критерієм максимізації отриманого ефекту множиною отримувачів. Попереднє оцінювання ефективності кожного виду товару за номенклатурою обліку передбачає таке: під час приймання по прибуттю партії вантажу персонал розподільчого терміналу вводить стандартну первинну інформацію з його масогабаритними характеристиками. Разом із нею вводять умовну оцінку корисного ефекту від цього виду товару для отримувача у звичайній лінгвістичній формі з урахуванням стану, рівня схоронності, терміну придатності ресурсу тощо. Ця оцінка поступово накопичується у відповідному інформаційному сховищі, яке стає основою для прогнозу критеріальної оцінки ефективності цього товару. Лінгвістичну первинну інформацію про рівень корисного ефекту запропоновано привести до оцінки d умовної 10-бальної шкали (де 10 – найвищий рівень корисності) за композиційним правилом нечітких висновків Заде, застосування якого можливо реалізувати за методикою, взятою з роботи [16].

Розглянемо ієрархічну модель автоматизації процесу розподілу товару «постачальники – розподільчі термінали – отримувачі». Технологічно вони беруть участь у ланцюгу в такий спосіб: отримують товар від попередньої ланки та після виконання своїх функцій передають результат далі, тобто формують «штовхаючу» логістичну систему. Останній у технологічному ланцюгу отримує ефект, за рахунок оцінювання якого формують нові замовлення на ресурс постачальнику, тобто АСПРТ стає адаптивною системою зі зворотним зв'язком. У реальних умовах існують транспортно-логістичні витрати Σe_i всіх суб'єктів ланцюга, але припустимо, що ці витрати покривають зовнішні джерела (спонсори, благодійні фонди тощо).

Завдання АСПРТ полягає в ухваленні рішення оперативним персоналом про розподіл за номенклатурою та кількістю обмеженого ресурсу між розподільчими терміналами на стратегічному рівні ієрархії. На тактичному рівні з використанням існуючої інфраструктури розподільчого терміналу підтримка рішення полягає в розподілі обмеженого ресурсу кількістю Σr_i між N отримувачами з метою максимізації отриманого ефекту Ω . Критерієм оптимальності поставимо задачу максимізації ефекту всього обсягу доставленої продукції й товарів із обмеженнями:

$$\Omega = \sum_{i=1}^N f_i(q_{n-1}, r_i) d_i - \sum_{i=1}^N (r_i e_i) \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\begin{cases} R = \sum_{i=1}^N r_i \\ q_i > 0, r_i \geq 0, \forall i \in \{1, N\} \end{cases}$$

де q_0, \dots, q_n – умовні пріоритети отримувачів, урахувані у випадку зниження кількості одиниць певного виду товару нижче заданого рівня;

$f_i(q_{n-1}, r_i)$ – виробнича функція i -го отримувача, яка показує зв'язок рівнів

вхідного потоку i рівня отриманої ефективності від використаних ресурсів;

d_i – дефазифікована оцінка корисного ефекту від одиниці кожного виду товару за номенклатурою обліку, що розподілена i -му отримувачу;

e_i – витратна ставка терміналу за розподіл одиниці ресурсу i -му отримувачу (можна припустити $e_i = 0$ за умови фінансування роботи терміналу зі спонсорських і благодійних джерел).

У більш загальному випадку рівень ефективності використання ресурсу d_i можна подати як вектор-множину, елементами якої є окремі показники ефективності використання того чи іншого виду товару за різними показниками. Умови в обмеженнях показують, що рівень пріоритету споживачу має бути наданий, і всю необхідну кількість товару слід розподілити і доставити.

Отримати рішення для цільової функції (1) з обмеженнями можна, якщо визначити структуру множини ресурсів r_i , які забезпечують хоча б не негативний ефект. Загалом функція (1) є нелінійною, тому розв'язати оптимізаційну задачу можна за допомогою градієнтних методів. При цьому виробнича функція $f_i(q_{n-1}, r_i)$ може мати достатньо складний вигляд. У роботі [13] показано, що з достатнім ступенем точності як виробничу можна використати функцію Коббса-Дугласа

$$q_n = Aq_{n-1}^\alpha r_i^{1-\alpha}, \quad (2)$$

де A, α – параметри функції Коббса-Дугласа, які встановлюють відомими методами факторного аналізу.

Після отримання оцінки можливого ефекту від використання товару АСПРТ дає варіанти можливих рішень про розподіл обмеженого ресурсу оперативному персоналу розподільчого терміналу.

Досягнення поставленої мети формування АСПРТ потребує технічного та організаційного вирішення окремих завдань відповідних технологічних ланок на терміналі, зокрема таких підсистем:

- реєстрації надходження та видавання товару;

- розміщення товарів для зберігання, відстеження переміщень товарів у терміналі;
- здійснення інвентаризації та корегування рівня залишків товару;
- реєстрації розподілу та відвантаження товару отримувачу з терміналу та повернення від отримувача;
- пакування, фасування товарів і формування необхідних комплектацій партій для отримувача;
- формування необхідних звітів і документації;
- повернення (або утилізації) товарів у разі псування.

Серед переваг запропонованої АСПРТ за участю залізниці допомоги слід виділити очікуване скорочення тривалості на доставлення товару та зменшення часу на операції з обробки, гарантію надійного рівня забезпеченості товаром, заміну людської праці під час виконання монотонної роботи, можливість ухвалення обґрунтованих рішень оперативним персоналом терміналу в результаті автоматизації обробки великої кількості інформації.

Висновки. Основою формування АСПРТ для перевезення товарів залізницею прийнято логістичні ланцюги «постачальники – розподільчі термінали – отримувачі». Проаналізовано можливі шляхи і стандартні типи подібних автоматизованих систем. Встановлено, що відмінністю такого ланцюга є практична відсутність безпосереднього інформаційного зв'язку між постачальником і отримувачем, зворотний зв'язок може бути реалізовано тільки за рахунок інформаційних потоків розподільчого терміналу. У подібній системі зазвичай не передбачено фінансових потоків і відповідної їм супутньої інформації. Це враховано з формуванням схеми інформаційного забезпечення модуля розподілу замовлення товару і дещо спрощує проектування самої АСПРТ.

Запропоновано шляхи формування АСПРТ як удосконаленої системи з елементами інтелектуального ухвалення рішення персоналом розподільчого терміналу. Рішення про характер розподілу передбачено отримати як результат формалізованої оптимізаційної задачі з урахуванням рівня корисного ефекту від використання товару як матеріального

ресурсу споживача. Прикладна цінність отриманих результатів полягає у створенні вимог до АСПРТ для перевезення товарів залізницею, де розподільчий термінал відіграє головну роль у логістичному ланцюзі між постачальником і отримувачем, що сприяє їхній швидкій адаптації до сучасних складних умов, у яких перебуває наша країна.

Список використаних джерел

1. Про залізничний транспорт: Закон України від 04.07.1996 р. № 273/96-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/273/96-%D0%B2%D1%80>.
2. Ларина Р. Р., Трушкина Н. В. Разработка модели оптимизации логистической сбытовой системы. *Менеджер*. 2002. № 6. С. 123-126.
3. Electronic data interchange for administration, commerce and transport (EDIFACT). ISO 9735-11:2022. Application level syntax rules (Syntax version number: 4, Syntax release number: 1). (en). URL: <https://www.iso.org/ru/standard/80091.html>.
4. Lomotko Denis, Kovalov Denis. The usage of genetic algorithms when planning railway transportation in international connection. *Transport technologies*. 2024. Vol. 5, No. 1. P. 64-71. <https://doi.org/10.23939/tt2024.01.064>.
5. Штерн Льюис В., Эль-Ансари Адель И., Кофлан Энн Т. Маркетинговые каналы: пер. с англ. Изд. 5-е. Москва: Издательский дом «Вильямс», 2002. 624 с.
6. Ozdemir A. I., Erol I., Ar I. M., Peker I., Asgary A., Medeni T. D. and Medeni I. T. (2021). The role of blockchain in reducing the impact of barriers to humanitarian supply chain management. *The International Journal of Logistics Management*. Vol. 32, No. 2. P. 454-478. <https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2020-0058>.
7. Abdul Rahman N. A., Ahmi A., Jraisat L. and Upadhyay A. (2022). Examining the trend of humanitarian supply chain studies: pre, during and post COVID-19 pandemic. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-01-2022-0012>.
8. Kwateng K. O., Tetteh F. K., Asare N. and Manu D. (2022). Can intercluster coordination mediate the relationship between supply chain flexibility and humanitarian supply chain performance? *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-09-2021-0086>.
9. Behl A. and Dutta P. (2020). Social and financial aid for disaster relief operations using CSR and crowdfunding: Moderating effect of information quality. *Benchmarking: An International Journal*. Vol. 27, No. 2. P. 732-759. <https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2019-0372>.
10. Woschank M., Dallasega Patrick and Kapeller J. A. (2020). The impact of planning granularity on production planning and control strategies in MTO: a discrete event simulation study. *Procedia Manufacturing*. Vol. 51. P. 1502-1507. doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.209.
11. Woschank M. and Dallasega P. (2021). The impact of logistics 4.0 on performance in manufacturing companies: a pilot study. *Procedia Manufacturing*. Vol. 55. P. 487-491. doi: 10.1016/j.promfg.2021.10.066.

12. Pettit S. and Beresford A. (2009). Critical success factors in the context of humanitarian aid supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. Vol. 39, No. 6. P. 450-468. <https://doi.org/10.1108/09600030910985811>.
13. Бурков В. В., Ириков В. А. Модели и методы управления организационными системами. Москва: Наука, 1994. 266 с.
14. Lomotko D., Kovalov A., Kovalova O. Formation of fuzzy support system for decision-making on merchantability of rolling stock in its allocation. *East. Eur. J. Enterp. Technol.* 2015. Vol. 6. P. 11–17. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.54496.
15. Olhager J. and Selldin E. Enterprise resource planning survey of Swedish manufacturing firms. *European Journal of Operational Research*. 2003. Vol. 146. P. 365-373.
16. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.
17. Intelligent transport systems. ISO 14813-1: 2015 (en). URL: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:14813:-1>.

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD 0000-0002-7624-2925. Тел. +38 (067) 576-06-61. E-mail: den@kart.edu.ua.

Ільчишин Василь Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничного транспорту, Інститут механічної інженерії та транспорту Національного університету «Львівська політехніка». ORCID iD 0009-0001-1207-6825. Тел. +38(067)3100200. E-mail: Vasyl.M.Ilchyshyn@lpnu.ua.

Ломотько Микола Денисович, PhD, асистент кафедри управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD 0000-0003-1730-1785. Тел. +38(067)5748381 E-mail: kolyan1890@gmail.com.

Кудряшов Дмитро Вікторович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. 0000-0003-4921-6534. Тел. +38(099)6059944. E-mail: auto.bearing.losk@gmail.com.

Lomotko Denis Viktorovych, Dr. Tech. Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Systems and Logistics of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD 0000-0002-7624-2925. Tel. +38 (067) 576-06-61. E-mail: den@kart.edu.ua.

Ilchyshyn Vasyl Mykhailovych, Cand. Tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport of the National University "Lviv Polytechnic". ORCID iD 0009-0001-1207-6825. Tel. +38(067)3100200. E-mail: Vasyl.M.Ilchyshyn@lpnu.ua.

Lomotko Mykola Denisovych PhD, Assistant Professor of the Department of Freight and Commercial Work Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD 0000-0003-1730-1785. Tel. +38(067)5748381. E-mail: kolyan1890@gmail.com.

Kudryashov Dmytro Viktorovych, PhD student of the Department of Transport Systems and Logistics of the Ukrainian State University of Railway Transport. 0000-0003-4921-6534. Tel. +38(099)6059944. E-mail: auto.bearing.losk@gmail.com

Статтю прийнято 12.12.2024 р.