



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 211

Харків 2025

УДК 656.2(062)

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

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

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

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

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

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

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

Реферативна база

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

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПП від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 3 від 28 березня 2025 р.

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

Редакційна колегія

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

Випусковий редактор – Харін 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)
Мартинів І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Bureika G., dsc, professor (VG TU, 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)
Онопрейчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофєєв С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофєєва Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (Tohoku
University, Японія)
Dittrich A., PhD, University of Liberec (Czech
Republic)

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)

Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Eimuntas Paršeliūnas, д.т.н., професор
(Вільнюський техн. ун-т ім. Гедімінаса, Литва)
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, д.т.н., професор
(Вільнюський техн. ун-т ім. Гедімінаса, Литва)
Шарій Г. І., д.е.н., професор (НУ «Полтавська
політехніка ім. Юрія Кондратюка)
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)
Коростельов Є. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ужвієва О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Малащук О. С., к.е.н., доцент (Одеський держ.
аграрний ун-т)
Капінос Н. А., к.е.н., доцент (Сумський нац.
аграрний ун-т)
Маланчук М. С., к.т.н., доцент (НУ «Львівська
політехніка»)

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)

<i>Стефанов В. О., Дзержинський І. В.</i> Системний аналіз аварій баштових кранів та інноваційні методи їх попередження	7
<i>Князєв С. А., Субботіна В. В., Князєва Г. О., Мейлехов А. О., Рябоштан В. А.</i> Розвиток технологій отримання псевдосплавів і тонких нанокристалічних покриттів	21
<i>Лалазарова Н. О., Комарова Г. Л., Афанасьєва О. В., Попова О. Г.</i> Локальне поверхнєве зміцнення високоміцного чавуну	34
<i>Xu MingWei, Wang XueFeng, Voronin S., Ovchynnikov O., Tryfonov T., Orliuk Y.</i> Energy consumption optimization control of hydraulic transmission systems	41

Теплоенергетика (144)

<i>Герба О. В.</i> Турбіни гвинтового типу: інновації в будівництві енергетичних установок	50

Будівництво та цивільна інженерія (192)

<i>Gvozdeckiy O., Milanko O., Tkachenko R., Yuzbashyan A., Romanenko S.</i> Operation of heat networks under conditions of «reduced» heating temperature schedule	60
<i>Zabarylo O. V., Korotkykh J. A., Zabarylo P. O.</i> Strengthening Ukraine's energy security through diversification of energy supply sources	75
<i>Романенко Д. Б., Крупченко О. А., Юрко П. А.</i> До визначення несучої здатності бібетонних армованих балок прямокутного поперечного перерізу	83
<i>Ромашко-Майструк О. В.</i> Визначальні параметри діаграми деформування стиснутого бетону за дії динамічних навантажень	92
<i>Томашевський А. В.</i> Чисельно-аналітична методика визначення внутрішніх зусиль у перерізах будівельних конструкцій	101
<i>Чайка Ю. І., Бурда Ю. О., Півненко Ю. О., Ткаченко Р. Б., Редько І. О.</i> Вентиляційні системи в цивільному та промисловому будівництві: комплексний огляд і шляхи модернізації	113
<i>Мудрий І. Б., Фречка М. М.</i> Особливості технології влаштування коротких шпунтових стін в умовах ущільненої забудови	122
<i>Семко О. В., Гасенко А. В., Гасенко Л. В., Мудрий І. В.</i> Зміна відносних деформацій волокон сталезалізобетонного перекриття сховищ під час бістадійної технології його виготовлення	130
<i>Трикоз Л. В., Зінченко О. С.</i> Дослідження змін пористості наповнених цементно-піщаних зразків за кінетикою їх водопоглинання	138
<i>Корчагін М. С.</i> Підвищення ефективності роботи теплових насосів для кліматичних умов України	148

Геодезія та землеустрій (193)

- Мамонов К. А., Метешкін К. О., Штерндок Е. С., Ковальчук В. С.* Організація територіального розвитку використання земель регіонів 157

Залізничний транспорт (273)

- Серіков Я. О., Брусенцов В. Г., Данова К. В., Герасименко В. А., Гаряжа О. В., Логвінков С. М.* Удосконалення знань здобувачів закладів вищої освіти з безпекових дисциплін як напрям зниження травматизму у виробничій і невиробничій сферах 166
- Бондаренко В. В., Візняк Р. І., Равлюк В. Г., Скуріхін Д. І., Бондаренко С. В.* Діагностування електронного обладнання пасажирських вагонів з урахуванням надійності його компонентів 172
- Ляшенко В. М., Яцько С. І.* Дослідження витрат електроенергії за повторно-короткочасного режиму роботи електрорухомого складу на ділянках різного профілю 181
- Хісматулін В. Ш., Прилипка А. А., Сосунов О. О., Ушаков М. В.* Система керування стрілочним електроприводом з обмеженням кінцевої швидкості переведення стрілки 196
- Крашенінін О. С., Шапатіна О. О., Васьковський А. А., Миколаєнко Д. О., Шпортак М. В.* Моделювання надійності тягового рухомого складу впродовж життєвого циклу 206

Транспортні технології (275)

- Хітров І. О.* Транспортна модель та її створення в середовищі макромодельовання 215
- Слинько О. Г., Столянов В. А.* Технологія тимчасового переобладнання та використання класичного контейнера в рефрижераторний шляхом встановлення термовкладишу та кріогазифікатора зі зрідженими кріогенними речовинами 225
- Погорілий О. В.* Розроблення ключових складових системи управління безпекою руху на підприємстві сфери залізничного транспорту 242
- Булгаков М. П., Мельник О. М., Волошин Д. А.* Розроблення адаптивного алгоритму використання водневого палива в суднових енергетичних установках 253
- Берестов І. В., Пестременко-Скрипка О. С., Колісник А. В.* Впровадження новітніх технологій для проведення митного контролю під час перевезення вантажів залізничним транспортом 269
- Ларіна І. М.* Стале функціонування як інтегральна характеристика техніко-технологічної системи контейнерного термінала 278
- Ломотько Д. В., Ільчишин В. М., Ломотько М. Д., Афанасова О. Ф.* Удосконалення технології передавання контейнеропотоку із зерновими вантажами для перевезення за участю залізничного транспорту 290
- Сергєєв В. С., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Шандер О. Е., Головка Т. В.* Формування моделі технологічного процесу підсистеми місцевої роботи сортувальної станції із застосуванням математичного апарату кольорових мереж Петрі 304

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 621.873.3

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ АВАРІЙ БАШТОВИХ КРАНІВ ТА ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ЇХ ПОПЕРЕДЖЕННЯ

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

SYSTEM ANALYSIS OF TOWER CRANE ACCIDENTS AND INNOVATIVE METHODS OF THEIR PREVENTION

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

***Анотація.** У статті здійснено комплексне дослідження причин виникнення аварій баштових кранів, які є критично важливими елементами будівельної інфраструктури, особливо під час зведення висотних споруд. Проаналізовано технічні, фізичні та експлуатаційні аспекти, що впливають на стійкість кранів, включаючи фактори навантаження, специфіку конструкції та вплив людського фактора. Зазначено, що аварійність, пов'язана з перекиданням або структурними руйнуваннями, становить до 40 % загальної кількості інцидентів із вантажопідійомними кранами, що загрожує безпеці не лише робочого персоналу, але й навколишньої інфраструктури.*

Стаття акцентує увагу на значенні прогнозування та систематичного управління ризиками. Особливий акцент зроблено на застосуванні передових технологій, зокрема систем штучного інтелекту і нейронних мереж, для розвитку автоматизованих систем контролю та забезпечення стійкості кранів під час змінних навантажень і обмеженого простору сучасних будівельних майданчиків. Результати дослідження мають прикладне значення для зменшення аварійності в будівництві та підвищення надійності експлуатації баштових кранів у складних умовах, що обумовлює актуальність теми для розвитку інженерних технологій і забезпечення безпеки праці на глобальному рівні.

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

***Abstract.** This article presents a comprehensive investigation into the causes of tower crane accidents, a critical concern considering their vital role in modern high-rise construction and the associated high risks. The analysis encompasses technical, organizational, and environmental factors that compromise crane stability. These include inherent design vulnerabilities (a high center of gravity coupled with a limited support base), dynamic external loads such as wind and seismic events, and the pervasive influence of human error across all stages of a crane's operational life.*

The study reveals that accidents involving tower crane overturning or structural collapse, often precipitated by hard-to-detect fatigue cracks, represent up to 40% of all lifting crane incidents. Such failures pose substantial threats not only to on-site personnel but also to adjacent structures and the general public. The growing density of urban construction, coupled with challenges like fluctuating operational conditions and inadequate operator training, amplifies these inherent risks. A global increase in tower crane utilization is unfortunately accompanied by a corresponding rise in accident

frequency, highlighting deficiencies in current safety protocols, even on technologically advanced "smart" building sites.

The research underscores the imperative for proactive, holistic risk management and enhanced safety systems. It places particular emphasis on harnessing cutting-edge technologies, most notably artificial intelligence and neural networks, to create automated monitoring and control mechanisms. These systems are designed to bolster crane stability under unpredictable and dynamic loading, and facilitate the early detection of structural weaknesses. The proposed approach uses sensors and machine learning algorithms for real-time data analysis and predictive control, representing a significant advancement over conventional, often reactive, safety methodologies. The findings offer practical benefits for minimizing construction accidents, improving the operational reliability of tower cranes in demanding environments, and promoting higher global standards of construction safety.

Keywords: *tower crane, accidents, stability, external loads, safety management system, forecasting, artificial intelligence, neural network.*

Актуальність теми дослідження.

Сучасне будівництво неможливе без використання різноманітного технологічного обладнання, зокрема вантажопідіймальних пристроїв. Баштові крани, які є основним елементом для зведення висотних споруд, забезпечують можливість переміщення важких вантажів на значні висоти і є невід'ємною складовою будівельних процесів. Однак експлуатація їх характеризується підвищеною аварійністю, що часто має трагічні наслідки. Це зумовлено специфікою конструкції баштових кранів – значна висота за обмеженої опорної бази спричиняє високий ризик нестійкості.

На тлі зростаючих вимог до будівельної техніки через збільшення щільності забудови та розширення спектру вантажів, які необхідно транспортувати, ефективність і безпечність баштових кранів стають дедалі актуальнішими. Часто будівельні майданчики межують з іншими спорудами чи лініями електропередач, що унеможливорює перевищення встановлених меж руху вантажів. Зміни в умовах експлуатації, зовнішніх навантаженнях, стані опорної частини, а також низька кваліфікація навченого персоналу й керівників створюють додаткові загрози для стабільної роботи кранів.

Вступ. Підходи для будівництва висотних об'єктів значно відрізняються в

різних країнах світу. Наприклад, у США раніше будівництво здебільшого здійснювалося за допомогою мобільних кранів або робочих платформ, і лише на початку XXI століття почалося активне впровадження баштових кранів [1]. У більшості країн Європи та Азії використання баштових кранів під час зведення висотних будівель є традиційним і щороку зростає. Так, у Південній Кореї кількість баштових кранів зросла з 3408 у 2015 році до 4385 у 2020 році, тобто на 22 % [2]. Починаючи з 2016 року спостерігається щорічне зростання попиту на баштові крани і в Китаї, де до кінця 2020 року їхня кількість досягла близько 410 000 одиниць [3]. Сьогодні у світі експлуатують понад мільйон кранів різної конструкції та вантажопідйомності, зокрема в Україні їх близько 5 тисяч [4]. У перспективі, незважаючи на появу різних технологій будівництва, баштові крани залишаться основними вантажопідіймальними механізмами, а їхня кількість продовжуватиме зростати.

В останні роки спостерігається зростання аварійності баштових кранів на будівельних майданчиках (рис. 1), причому вони становлять до 40 % загальної кількості аварій стрілових вантажопідіймальних кранів [5]. Основна частка аварій спричинена втратою стійкості крана та його перекиданням, часто з попереднім

руйнуванням металоконструктивних елементів.

Ці інциденти завдають шкоди не лише будівельній інфраструктурі та здоров'ю

персоналу, що перебуває на майданчику, а й становлять небезпеку для інших споруд і людей поблизу, оскільки радіус падіння крана може бути досить значним.



Рис. 1. Аварії баштових кранів із руйнуванням: стріли (м. Львів, 24.10.2024) і башти (м. Рівне, 16.03.2016)

Аналіз аварій кранових систем, поданий у роботі [6], вказує на те, що руйнування конструкцій зазвичай ініціюється в найбільш навантажених вузлах несучих металоконструкцій. У таких вузлах, часто недоступних для візуального огляду, під час експлуатації виникають і розвиваються тріщини.

На ранніх стадіях розвитку тріщини розподіл напружень у вузлі та розкосах може незначно відрізнятися від розрахункового, оскільки зміна площі поперечного перерізу в зоні тріщини є незначною. Проте зі збільшенням довжини тріщини та кількості її гілок ефективна площа поперечного перерізу зменшується, що призводить до локального зростання напружень у металі. Ураховуючи загальну рівновагу фермової конструкції, після повного руйнування матеріалу в зоні тріщини на решту елементів конструкції діють додаткові навантаження, раніше сприймані зруйнованим елементом.

Ці тріщини (рис. 2) можуть розвиватися як повільно внаслідок втоми

матеріалу, так і катастрофічно швидко. Останній сценарій є найбільшою небезпекою, оскільки відбувається без помітних деформацій або видимих тріщин, що ускладнює їх діагностику.



Рис. 2. Розвиток втомної тріщини в отворі для кріплення з'єднувального елемента стріли

Основними етапами аналізу аварійності баштових кранів є збір і аналіз даних про аварії та їх систематизація.

Статистичні дані свідчать про стійку тенденцію до зростання кількості аварій баштових кранів як в Україні, так і світі. Наприклад, в Іспанії за період з 2012 по 2021 рік унаслідок аварій баштових кранів загинуло 62 працівники [7], а в Південній Кореї з 2015 по 2020 рік відбулося понад 40 аварій із тенденцією до зростання. У Китаї за період з 2016 по 2018 рік щорічно реєстрували понад 100 аварій [8], а вже у 2020 році, за даними Міністерства житлового будівництва та розвитку міських і сільських районів КНР [9], відбулося близько 125 аварій. Ці дані є особливо показовими на тлі зростання кількості інтелектуальних будівельних майданчиків у Китаї, оснащених системами візуалізації та іншими сучасними технологіями, що мали б сприяти зниженню аварійності.

Проте впровадження інтелектуальних систем управління не завжди призводить до бажаного результату. Надмірне навантаження на оператора крана, пов'язане з управлінням складним інтерфейсом, може призвести до зростання кількості помилок, таких як плутанина в режимах роботи і втрата ситуаційної обізнаності.

Отже, зростання кількості аварій баштових кранів обумовлене не лише збільшенням їхньої кількості, але й недостатньою увагою до проблем безпечної експлуатації. Для ефективного вирішення цієї проблеми необхідно розширити концепцію «людина-машина-середовище», включивши до неї технічні та фізичні аспекти робочого середовища оператора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведено аналіз наукових публікацій за період із 2018 по 2023 роки, присвячених дослідженню причин аварій баштових кранів і розробленню методів запобігання цьому.

Аналіз вітчизняних досліджень свідчить про те, що основну увагу приділено аналізу конкретних аварій і впливу окремих

факторів, таких як раптові пориви вітру чи коливання вантажу [10-12]. Тобто дослідження зосереджені на безпосередніх причинах аварій, не завжди враховуючи складну взаємодію різних факторів, що призводить до катастрофічних наслідків.

Для комплексного розуміння причин аварій необхідно виходити за межі аналізу окремих випадків і виявляти системні фактори, що сприяють виникненню аварійних ситуацій. Це дасть змогу простежити розвиток подій від першопричин до безпосередніх причин аварії та оцінити взаємодію системи «людина-машина-середовище».

Зарубіжні дослідження в галузі безпеки експлуатації баштових кранів охоплюють три основні напрями:

- аналіз причин аварій [13, 14];
- розроблення систем моніторингу та обладнання для виявлення небезпечних ситуацій у режимі реального часу [15, 16];
- оцінювання факторів безпеки з урахуванням структурно-механічних характеристик кранів [17-19].

На підставі проведених досліджень фахівці пропонують різні методи запобігання безпосереднім причинам аварій баштових кранів, таких як помилки оператора, руйнування конструкційних елементів і несприятливі умови експлуатації. Проте сучасна практика оцінювання ризиків має певні недоліки. Зокрема, недостатньо уваги приділено комплексному оцінюванню ризиків протягом усього життєвого циклу крана. Крім того, виявлено, що сучасні методи оцінювання ризиків часто базовані на неповних даних, обмеженому наборі параметрів і відсутності спеціалізованого програмного забезпечення.

Недосконалість систем управління безпекою є систематичною проблемою, яка призводить до багатьох аварій. Для підвищення рівня безпеки необхідно розробити комплексний підхід, який урахуватиме всі фактори, що впливають на надійність і безпеку кранів. Вивчаючи умови експлуатації та особливості

управління кранами, можна отримати цінну інформацію для вдосконалення конструкцій і систем управління нових машин.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є проведення комплексного дослідження причин аварій, що трапляються під час експлуатації баштових кранів як в Україні, так і за кордоном. На основі отриманих результатів заплановано розробити пропозиції з підвищення рівня безпеки за використання цього виду підйомно-транспортного обладнання. Особливу увагу буде приділено аналізу можливостей використання цифрових технологій, зокрема штучного інтелекту, для забезпечення стійкості баштових кранів за умов непередбачуваних зовнішніх впливів і діагностики стану їхніх несучих конструкцій.

Основна частина дослідження. В основі більшості аварій лежать людські помилки, тобто людський фактор. Помилки можна припуститися на всіх етапах життєвого циклу баштового крана (рис. 3). Основними причинами аварій баштових кранів є технічні фактори, які становлять понад 60 % усіх випадків. Значна частина аварій, понад 30 %, виникає через організаційні причини, зокрема порушення технологічної і трудової дисципліни протягом усього життєвого циклу крана. Щорічно у світі понад 10 % аварій баштових кранів відбувається внаслідок дії сукупності несприятливих зовнішніх факторів, серед яких переважають екстремальні умови: вітрові навантаження, вибухи, землетруси тощо. Часто ці причини взаємопов'язані.

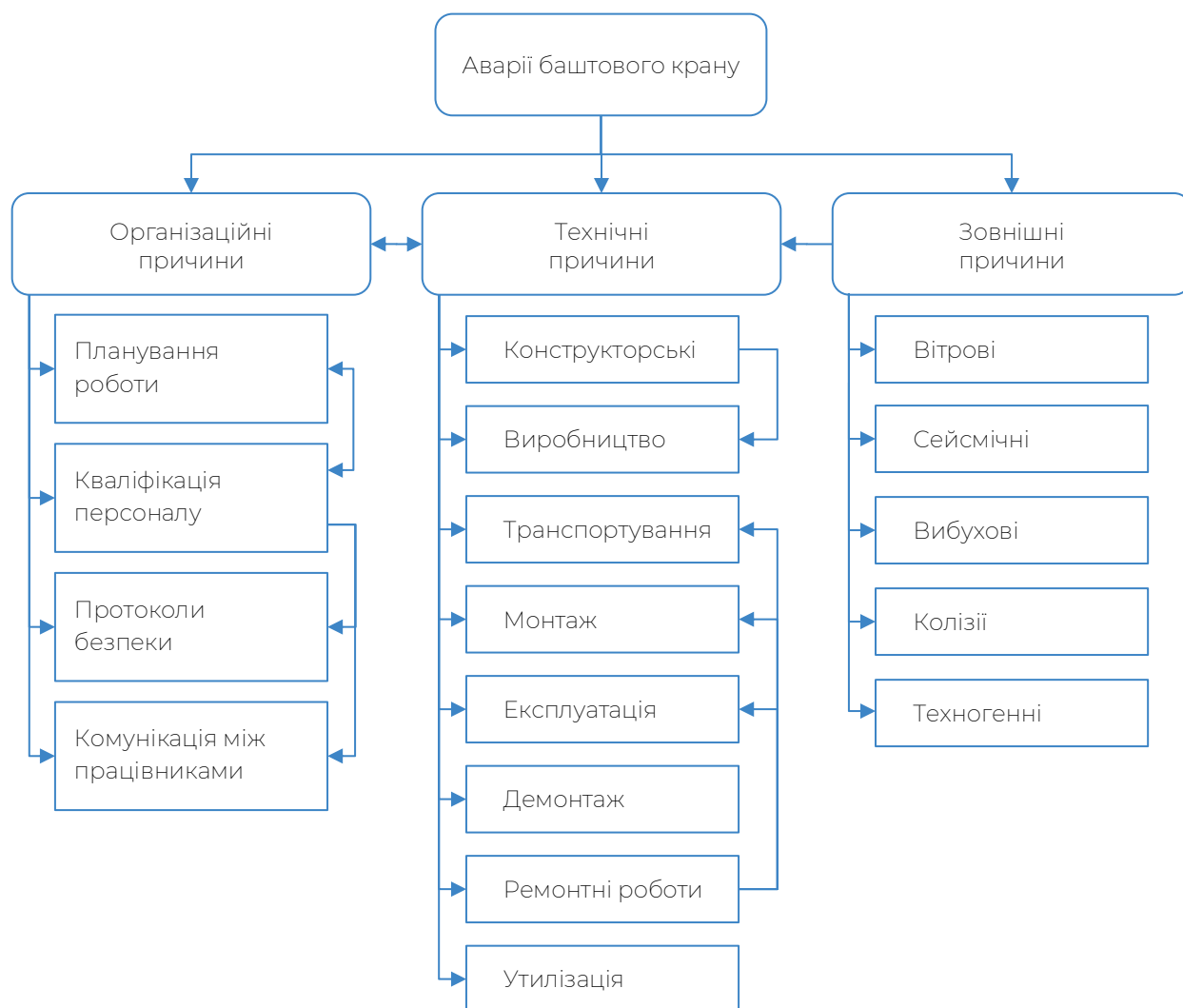


Рис. 3. Причини аварій баштових кранів

Незважаючи на значний практичний досвід конструювання кранів і досягнення в галузі їх розрахунків, з проєктуванням залишається багато невирішених питань. Сучасні методи будівельної механіки та використання електронно-обчислювальних машин дають змогу створювати складні розрахункові моделі та розв'язувати задачі в динамічній постановці, що принципово точно дає змогу визначити зусилля в елементах баштових кранів і їх переміщення під дією заданих зовнішніх сил. Проте оцінювання виконання умов міцності, стійкості, довговічності та інших критеріїв здійснюється досить наближено, оскільки не враховує податливість металоконструкцій і наявність додаткових пікових навантажень. Конструктори та розробники нормативів визначають розрахункові комбінації навантажень і коефіцієнти, порівнюючи діючі зусилля і опори переважно на основі досвіду. Роль наукового аналізу переважно обмежена узагальненням досвіду проєктування та експлуатації кранів. Наприклад, ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проєктування» [20] не може повністю замінити ГОСТ 1451-77 [21], оскільки не містить рекомендацій щодо розрахунку вітрового навантаження на кран у робочому стані та вітрового навантаження, що діє на вантаж [22], а РД 22-166-86 (введений замість ГОСТ 13994-81) [23] не дає рекомендацій щодо розрахунку стійкості в різних експлуатаційних станах: поворот башти крана, зміна вильоту або поєднання цих робочих операцій.

За вимогами цього нормативного документа, стійкість крана перевіряють за найнебезпечніших умов його роботи. Навантажувальну стійкість крана перевіряють як для максимального, так і мінімального вильоту:

$$M_{ym} = G_o b k, \quad (1)$$

$$M_o = Q^H b Q + M_{wp}^H, \quad (2)$$

де M_{ym} – утримуючий момент відносно ребра перекидання від сили тяжіння крана;

G_o – нормативна складова маси крана;

M_o, M_{wp}^H – перекидні моменти відносно ребра перекидання відповідно від маси вантажу, динамічних навантажень і вітрового навантаження робочого стану (рис. 4);

Q^H – нормативна складова маси вантажу;

bQ – відстань від точки підвісу вантажного поліспада до вертикальної площини, що проходить через ребро перекидання.

Власну стійкість кранів із маневровою зміною вильоту контролюють за положення стріли на максимальному вильоті:

$$M_o = M_{wp}^H. \quad (3)$$

За раптового зняття навантаження

$$M_o = M_{wp}^H + 0,3 Q^H b Q. \quad (4)$$

Критерієм виконання умови стійкості є співвідношення

$$k M_o \leq m_o M_{ym}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт перевантаження (що враховує відхилення навантажень у несприятливий бік);

m_o – коефіцієнт умов роботи.

Щоб оцінити відношення утримуючого моменту до перекидного, використовують коефіцієнт стійкості K :

$$K = M_{yt} / M_o. \quad (6)$$

Перекидний момент від маси вантажу, що підіймає стріловий кран, тим більший, чим більше маса вантажу і виліт гака від ребра перекидання. Під ребром перекидання розуміють грань опорного контуру, відносно якої сили прагнуть перекинути кран (рис. 4), для рейкових кранів ребро перекидання приймають за центрами

ходових візків. Для визначення стійкості крана використовують також такі величини: G – маса противаги; W_p – вітрове навантаження; R_1, R_2, R_3, R_4 – реакції в опорах; Q – маса вантажу; $m_{стр}$ – маса стріли;

b – відстань від центра мас частин крана до вертикальної площини, що проходить через ребро перекидання. Проте не враховують, що фактично різні навантаження можуть діяти на кран одночасно.

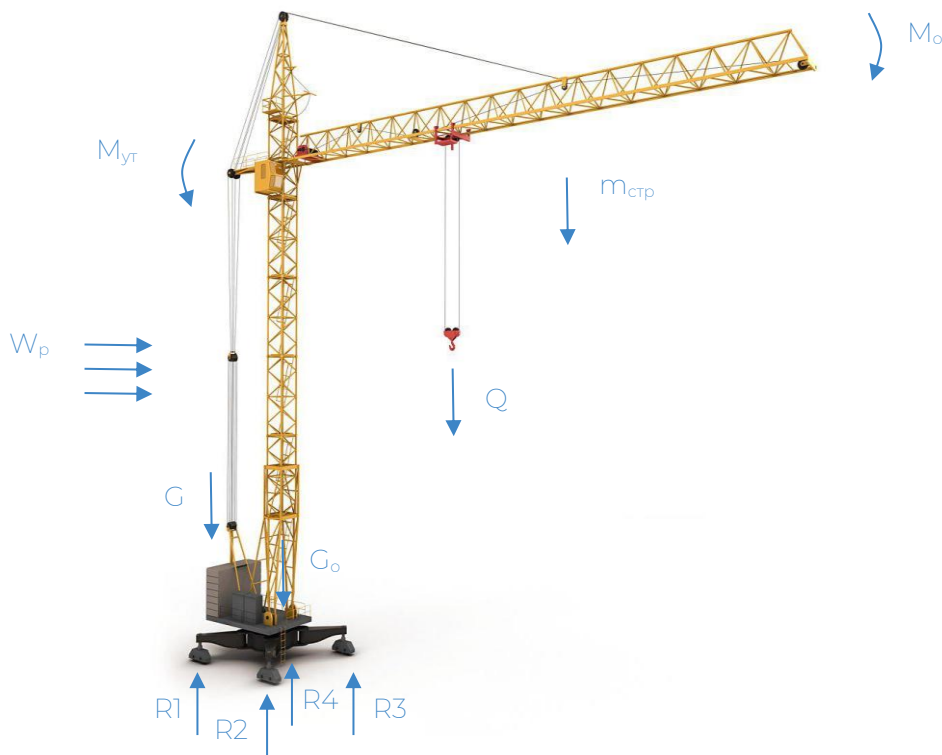


Рис. 4. Схема дії навантажень для визначення стійкості

Деякі з них можна вважати незалежними (наприклад вага вантажу і вітер) і ймовірність їх збігу визначати статистичними методами, інші (наприклад вага вантажу і динаміка піднімання) функціонально пов'язані. Ці фактори можуть призводити до різкої зміни навантажень на несучі металокопструкції, опори і рейкові шляхи баштового крана. Вплив зазначених факторів та інших експлуатаційних станів і комбінацій навантажень на міцність і стійкість залишається мало дослідженим, ряд дослідників пропонують їх отримувати, обчисливши зміну реакції в опорах баштового крана за різних експлуатаційних

станів [24-26]. Але руйнування в ряді випадків аварій відбувається не внаслідок перекидання всього крана, а в результаті втрати стійкості опору матеріалу несучих металокопструкцій башти або стріли. Автори цієї статті пропонують визначати і фіксувати зміну зусиль за допомогою датчиків у несучих металокопструкціях башти і стріли. Результати розрахунків слід порівнювати з результатами, отриманими нормативними методами розрахунку, а також результатами, отриманими на спроектованих об'ємних моделях крана і проведених експериментах.

До конструктивних особливостей крана слід віднести складність фермової

конструкції башти і стріли, їхню високу вітрову поверхню, складність розрахунку з'єднання башти з основою крана, циклічність навантаження, у тому числі з урахуванням екстремальних впливів вітрових, вибухових, сейсмічних та інших навантажень, що впливають на стійкість опору матеріалів і т. д. Через це норми часто виявляються малоефективними для створення сучасних конструкцій і використання нових матеріалів. Саме тоді гостро відчувається мала гнучкість і універсальність емпіричних норм, відсутність аналітичних методів для їх обґрунтування. Усе це свідчить про те, що теорія і загальні методи розрахунку кранів потребують подальшого розвитку. Застосовувані норми і методи розрахунку через перелічені принципові недоліки призводять зазвичай до необґрунтованого перевитрачання металу і подорожчання, уповільнюють вдосконалення і створення нових високоефективних і надійних кранів. Усунути ці недоліки можна, наприклад, із позицій імовірнісних теорій надійності механічних систем і навантажень.

В експлуатації баштових кранів основними причинами, що призводять до аварійних ситуацій, є:

- перевантаження, підймання вантажу більшого за нормативну вантажопідйомність;
- наявність дрібних дефектів (що виникли з виготовленням, транспортуванням і монтажем), не виявлені з введенням крана в експлуатацію;
- зношення механізмів і агрегатів, використовуваних на робочому крані, вище допустимого;
- неякісні демонтажні та ремонтні роботи перед пуском крана в експлуатацію після монтажу;
- відсутність належного контролю під час експлуатації, у тому числі відхилення або роботи з несправними приладами безпеки;

- відсутність кваліфікованого персоналу, допущеного до експлуатації баштового крана;

- відхилення від технології виготовлення та неналежний контроль якості на виробництві.

Баштові крани мають тривалий термін служби, неодноразово подовжуваний. Виходячи з цього, суттєвою причиною аварійності є велика кількість обладнання, яке відпрацювало свій розрахунковий ресурс. Отже, сьогодні ще використовують багато кранів, не оснащених сучасними технологіями автоматизації та датчиками. Тому існує технологічна та економічна доцільність не тільки оснащення нових моделей кранів, але й модернізації експлуатованих баштових кранів пристроями безпечного управління. Ці пристрої сприятимуть експертно-діагностичному обстеженню баштових кранів, спрямованому на виявлення дефектів, а також запобіганню аварійним ситуаціям, що набуває особливої важливості та актуальності.

Аналіз статистичних даних свідчить, що для баштових кранів характерний підвищений рівень аварійності порівняно з іншими типами підйомно-транспортного обладнання. Одним з основних факторів, що обумовлюють таку тенденцію, є специфіка експлуатації баштових кранів, яка передбачає часту зміну місця роботи і відповідно проведення монтажних і демонтажних робіт. Віддаленість об'єктів будівництва від сервісних центрів ускладнює забезпечення належного технічного обслуговування та контролю якості виконання монтажних робіт.

Значним є людський фактор – 92,9 % всіх нещасних випадків із кранами мали той чи інший тип втручання людини [27]. Дія або бездіяльність людини – одна з найчастіших причин аварій баштових кранів. Виключити негативний вплив «людського фактора», наприклад за рахунок повної автоматизації вантажопідйомного процесу, дорого і складно. Тому способи часткового обмеження дій працівників у

робочому процесі є дуже актуальними для експлуатуючих організацій. На сьогодні ефективність робочого процесу пов'язана з механізацією виробничих робіт, введенням обмежувальних і попереджувальних приладів, пристроїв безпеки (рис. 5).

До таких приладів і пристроїв відносять:

- обмежувач вантажопідйомності, висоти підймання та переміщення вантажу;

- обмежувач повороту і висування вежі;
 - обмежувач пересування крана;
 - анемометр;
 - автоматичне стопоріння вантажного візка з обривом візкового каната;
 - захист від падіння вантажу і стріли з обривом будь-яких із трьох фаз;
 - датчик зміни кута нахилу стріли;
 - протиугінний пристрій тощо.

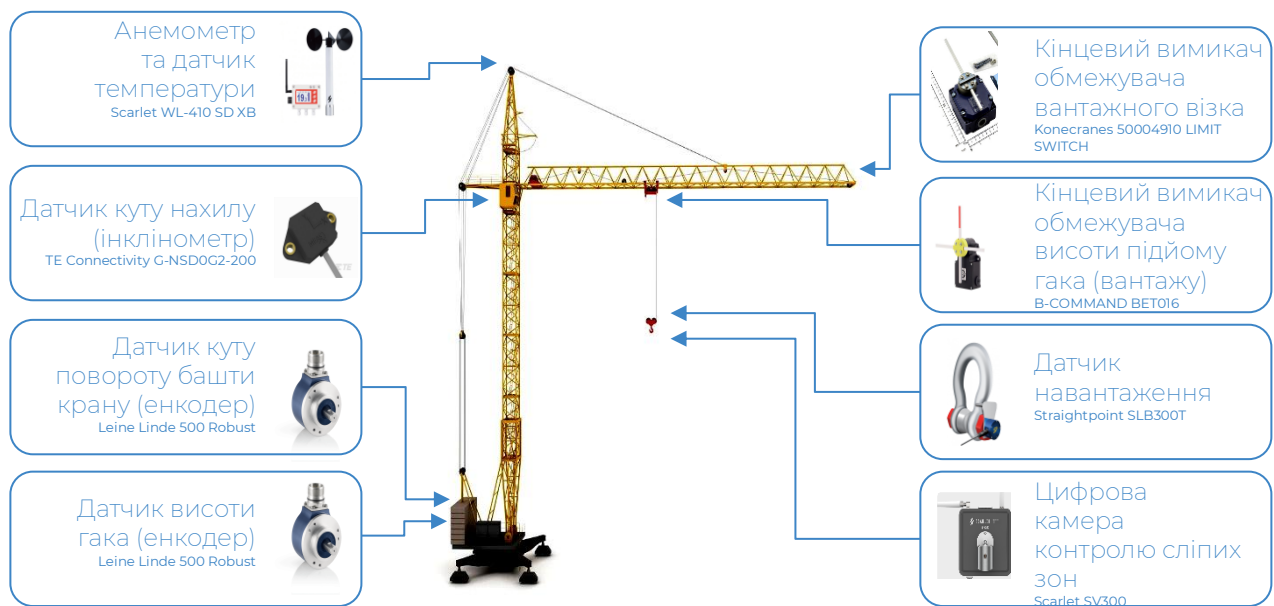


Рис. 5. Приклади приладів і пристроїв безпеки

Зазначені пристрої спрямовані на корегування людської діяльності задля забезпечення безпечних умов праці, однак не є абсолютним гарантом запобігання нещасним випадкам. Зокрема, обмежувачі вантажопідйомності баштових кранів автоматично відключають механізми підйомних кранів у разі перевищення допустимої маси вантажу, що запобігає аварійним ситуаціям. Проте зафіксовано випадки експлуатації кранів із вимкненими обмежувачами або пошкодженими пристроями безпеки. Крім того, на вітчизняних кранах досі переважно

використовують не електронні, а електричні пристрої безпеки. Отже, існує необхідність удосконалення системи забезпечення безпеки.

Системи дистанційного моніторингу дають змогу фіксувати вихід із ладу або вимкнення пристроїв безпеки. За допомогою бездротових сенсорних мереж інформацію збирають із датчиків, передають до центрального вузла та візуалізують у вигляді інтуїтивно зрозумілої для користувача схеми, а також активують сигналізацію у випадку порушення запрограмованих правил безпеки.

Застосування систем дистанційного моніторингу кранів суттєво підвищує безпеку робіт. Слід зазначити, що на сьогодні нема оптимальних методик, які давали б змогу на етапі експлуатації оцінити ймовірність виникнення ризикових ситуацій, зумовлених відмовою обладнання або дефектами металоконструкцій. У зв'язку з цим зростає актуальність контролю безпечної експлуатації баштових кранів на небезпечних виробничих об'єктах. Для вирішення цієї проблеми запропоновано метод оцінювання, заснований на експертних оцінках і використанні сучасних інформаційних систем.

Розроблювана система забезпечення безпечної експлуатації має виконувати такі функції:

- контроль і зміна параметрів баштового крана з урахуванням змін зовнішніх навантажень;
- формування керуючих сигналів до приводних механізмів.

Завдання розроблення системи полягає в реалізації активного управління стійкістю баштового крана з випередженням у період дії різних пікових зовнішніх навантажень, таких як раптові пориви вітру тощо.

Переваги запропонованої системи:

- використано екстраполяцію зовнішніх навантажень на основі методів штучного інтелекту;
- систему розроблено для діагностування стану несучих металоконструкцій стаціонарних і пересувних баштових кранів.

Принцип роботи заснований:

- на фіксації навантаження на опорах башти і відхилення точок розташування відносно осі та опорної поверхні, порівнянні їх із розрахунковими даними та машинному аналізі можливого розвитку процесу;
- коректуванні положення поворотної частини баштового крана відносно напрямку навантаженої опори

башти і видавання випереджальних сигналів до механізмів для примусової зміни кутового положення поворотної частини.

Система безпеки базована на нейромережових і логічних алгоритмах. Нейромережовий алгоритм використовують для прогнозування напрямку та швидкості зміни навантаження, тоді як логічний алгоритм слугує для визначення критичних значень навантаження і швидкості (на основі прогнозованих значень) та управління приводами з метою своєчасного переведення баштового крана в безпечний стан.

Система безпеки баштових кранів складається з підсистеми збору інформації про параметри зовнішніх навантажень і параметри баштового крана, підсистеми нейромережового прогнозування та підсистеми управління приводами (рис. 6).

Підсистема збору інформації включає датчики, деякі з них уже є в сучасних обмежувачах вантажопідйомності (датчик швидкості вітру, положення стріли, висоти підймання гака, вильоту гака). Додатково баштовий кран необхідно обладнати датчиками рівня, наприклад TE Connectivity G-NSD0G2-200 (рис. 7, а) (один біля основи башти, інший на висоті кабіни), і навантаження, наприклад тензодатчика SAINTBOND LC7001B (рис. 7, б) (на кожній із чотирьох опор, біля основи башти).

Підсистема нейромережового прогнозування реалізована на основі плати розширення з нейромережовим алгоритмом. Підсистема управління приводами баштового крана базована на програмованому логічному контролері.

Умовою безпеки є генерація підсистемою нейромережового прогнозування сигналу управління та його обробка підсистемою управління для активації приводів до досягнення максимально допустимого навантаження на одну з опор башти або критичного перекидного моменту.

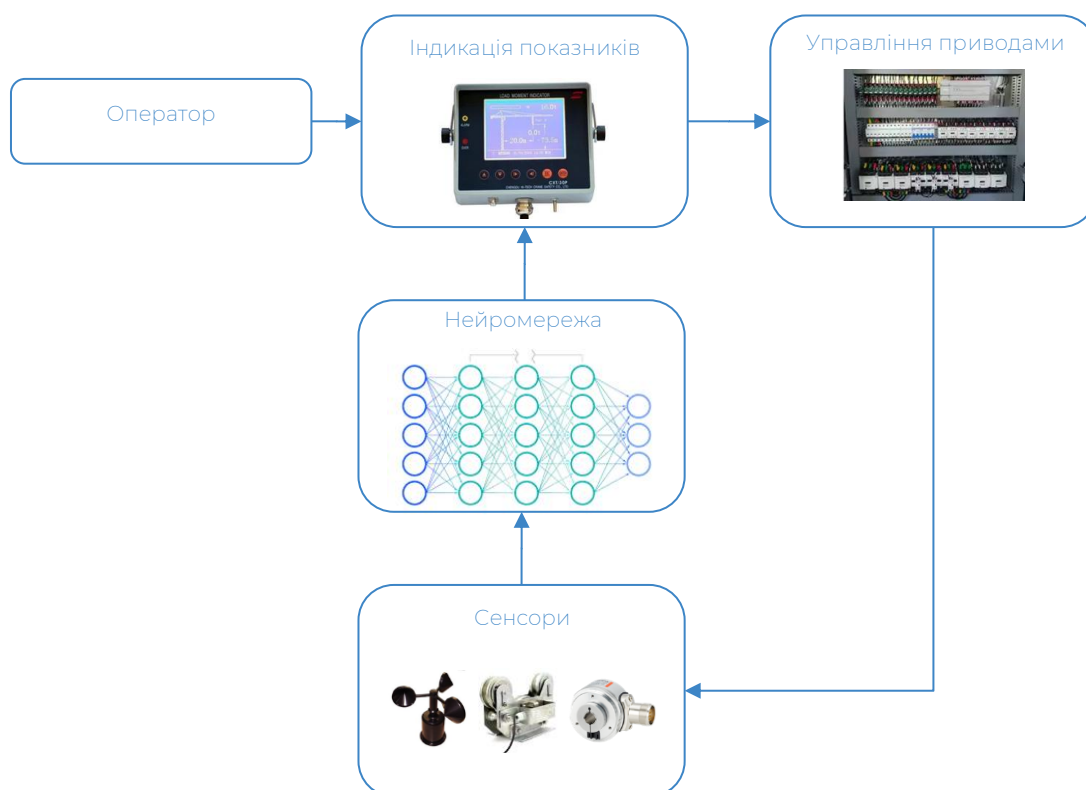


Рис. 6. Загальна схема роботи системи безпеки

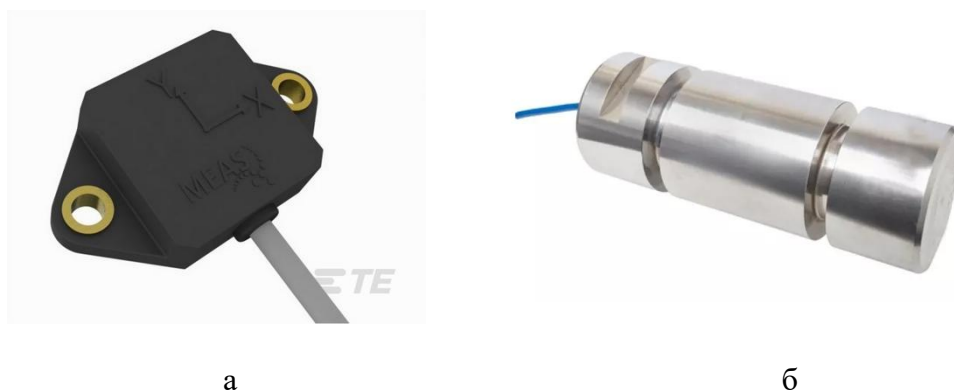


Рис. 7. Інклінометр TE Connectivity G-NSD0G2-200 (а), тензодатчик SAINTBOND LC7001B (б)

Система безпеки спочатку подає сигнал машиністу та пропонує дії з переведення крана в неробочий стан відповідно до інструкції з експлуатації. У разі ігнорування сигналу або досягнення небезпечного рівня навантаження, що

перевищує допустиме значення, система автоматично втручається в роботу машиніста.

Під час перевірок нейромережових алгоритмів у процесі експлуатації баштового крана можливе їх донавчання. Це

зумовлено тим, що під час роботи крана база даних параметрів зовнішніх навантажень постійно поповнюється, і обчислювальної потужності архітектури нейромережевих алгоритмів, закладеної для їхнього навчання, може бути недостатньо.

Неперервний контроль з екстраполяцією параметрів на майбутній стан дасть змогу реалізувати проактивний захист, який забезпечить раннє виявлення небезпечних перевищень зовнішніх навантажень.

Наступним етапом дослідження є порівняння результатів роботи систем управління, побудованих на методах:

- нечіткої логіки;
- штучних нейронних мереж;
- нейро-нечіткої логіки.

Аби оцінити рівень безпеки виконання робіт баштовим краном на будівельному майданчику загалом, у керівника будівництва та машиніста має бути відповідна інформація, отримана безпосередньо на будівельному майданчику, щоб відображувати реальні умови роботи, і доступна на комп'ютерах, планшетах і смартфонах, використовуваних працівниками будівництва.

Цифрові електронні пристрої безпеки баштових кранів здатні передавати дані безпосередньо до бортової електронної системи управління краном, де їх автоматично обробляють, усуваючи в такий спосіб тривалі та повторювані перетворення на різних етапах передавання даних. Коли система має вихід в Інтернет, оброблені дані можуть отримувати керівники будівництва та персонал, що перебуває в офісі компанії, далеко від будівельного майданчика. Це дає змогу оператору баштового крана і керівнику будівництва бачити одні й ті самі дані.

Наступним кроком у вдосконаленні цих технологій є підключення систем до хмарних сервісів і зберігання бази даних у хмарі. У результаті системи безпеки завжди мають резервну копію бази даних у хмарі.

Ця інформація може бути надзвичайно важливою для процесів ухвалення рішень, але лише за умови її правильного використання. Великі масиви необробленої первинної інформації, яку збирають окремі прилади, мають обмежену користь. Однак, якщо ці дані буде збирати система через Інтернет, автоматично обробляти і подавати у зручному форматі, менеджери компаній, особливо ті, хто відповідають за безпеку, зможуть протягом кількох хвилин отримувати точну інформацію про роботу свого обладнання та ситуацію на багатьох будівельних об'єктах.

Пропоновані вдосконалення покликані підвищити безпеку кранів і їхню ефективність у вирішенні завдань сучасних будівельних проєктів із жорсткими графіками. Очікувана економічна вигода від покращення характеристик крана в безпечній експлуатації значно перевищує витрати на встановлення різних пристроїв.

Висновки. Проблематика забезпечення стійкості баштових кранів за умов комплексних зовнішніх впливів є актуальним завданням сучасного будівництва. Традиційні підходи для оцінювання навантажень і розрахунків міцності часто не враховують динамічний характер вітрових та інших зовнішніх навантажень, нелінійні деформації металоконструкцій та інші фактори, що впливають на стійкість кранів.

Проведене дослідження показало, що тісний взаємозв'язок між організаційними, технічними та зовнішніми факторами значно ускладнює забезпечення експлуатації баштових кранів. Для адекватного оцінювання ризиків необхідно враховувати не лише статичні навантаження, але й динамічні процеси, що виникають під час роботи крана. Зокрема, вітрове навантаження, один з основних факторів, що впливають на стійкість крана, має пульсуючий характер і залежить від багатьох параметрів, таких як швидкість вітру, його напрямок, форма і розміри конструкції крана.

Для вирішення цієї проблеми було розроблено інноваційну систему забезпечення стійкості баштових кранів, базовану на методах штучного інтелекту. Система здійснює постійний моніторинг параметрів роботи крана та навколишнього середовища, прогнозує можливі ризики та видає рекомендації з корегування режимів роботи. Використання методів машинного

навчання дає змогу системі адаптуватися до змінних умов експлуатації та підвищувати точність прогнозування.

Перспективами подальшого розвитку теми є моделювання навантажень і розроблення автоматизованої системи контролю безпечної роботи кранів за умов комплексного впливу факторів зовнішнього середовища.

Список використаних джерел

1. Shapira A., Lucko G., Schexnayder C. Cranes for building construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2007. Vol. 133, No. 9. P. 690–700.
2. Kim J., Kim G. Importance Ranking of Accident Factors of Construction Tower Crane by AHP Technique. *Journal of Building Construction and Planning Research*. 2020. Vol. 8. P. 237–244. DOI: 10.4236/jbcpr.2020.84015.
3. Yang Y., Shao B., Jin L., Zheng X. Collaborative Governance of Tower Crane Safety in the Chinese Construction Industry: A Social Network Perspective. *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 6. Article 836. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12060836>.
4. 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.
5. Іваненко О. І., Щербак О. В., Любімов Ю. Ю. Комп'ютерне моделювання стійкості на моделі баштового крана на основі визначення опорних реакцій. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2020. № 18. ISSN 2222-3428. URL: <http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/02/2020-18-6.pdf>.
6. Колісник М. П., Заяць Г. В., Червоноштан А. Л., Калашник Д. В. Аналіз причин падіння баштового крана КБ-674а. *Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры*. Днепр, 2016. Вып. 88. С. 185–193.
7. Herrera-Pérez V., Salguero-Caparrós F., Pardo-Ferreira M. del C., Rubio-Romero J. C. Key Factors in Crane-Related Occupational Accidents in the Spanish Construction Industry (2012–2021). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. № 22. P. 7080. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20227080>.
8. Zhang X., Zhang W., Jiang L., Zhao T. Identification of Critical Causes of Tower-Crane Accidents through System Thinking and Case Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020. Vol. 146, No. 7. Article 4020071. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001860](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001860).
9. Chen Y., Zeng Q., Zheng X., Shao B., Jin L. Safety supervision of tower crane operation on construction sites: An evolutionary game analysis. *Safety Science*. 2022. Vol. 152. Article 105578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105578>.
10. Горбатюк Є., Міщук Д., Булавка О., Волянчук В. Аналіз досліджень стаціонарних баштових кранів при вітрових навантаженнях. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2023. № 102. С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0201>.
11. Krupko I., Ivanenko O., Yermakova S. Substantive provisions of improvement of methods of calculation of loads on carrying and propelling devices of lifting and transport machines.

Norwegian Journal of Development of the International Science. 2021. Vol. 1, № 57. P. 54–59. ISSN 3453-9875. DOI: <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-57-1-54-59>.

12. Горбатюк Є., Булавка О. Огляд і аналіз пошкоджень та існуючих систем захисту баштових кранів під впливом вибухової хвилі. *Автомобільний транспорт*. 2024. № 53. С. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.02>.

13. Dhalmahapatra K., Shingade R., Mahajan H., Verma A., Maiti J. Decision support system for safety improvement: An approach using multiple correspondence analysis, t-SNE algorithm and K-means clustering. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 128. P. 277–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.044>.

14. Kim J. Y., Lee D. S., Kim J. D., Kim G. H. Priority of Accident Cause Based on Tower Crane Type for the Realization of Sustainable Management at Korean Construction Sites. *Sustainability*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010242>.

15. Khodabandelu A., Park J., Arteaga C. Crane operation planning in overlapping areas through dynamic supply selection. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 117. Article 103253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103253>.

16. Li X., Chi H., Wu P., Shen G.Q. Smart work packaging-enabled constraint-free path re-planning for tower crane in prefabricated products assembly process. *Advanced Engineering Informatics*. 2020. Vol. 43. Article 101008. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.101008>.

17. Sadeghi S., Soltanmohammadlou N., Rahnamayiezekavat P. A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements. *Safety Science*. 2021. Vol. 133. Article 105002. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105002>.

18. Zhang X., Zhang W., Jiang L., Zhao T. Identification of Critical Causes of Tower-Crane Accidents through System Thinking and Case Analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020. Vol. 146. No. 7. Article 4020071. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001860](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001860).

19. Zhou W., Zhao T., Liu W., Tang J. Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective. *Safety Science*. 2018. Vol. 109. P. 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.05.001>.

20. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2006. 77 с.

21. ГОСТ 1451-77. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения. Москва: Стандарт, 1977. 28 с.

22. Кльон А. М., Трет'як А. В. Визначення вітрового навантаження на баштовий кран за ГОСТ 1451-77 та ДБН В.1.2-2:2006. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2022. Вип. 4 (70). С. 42-44. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.042>.

23. РД 22-166-86. Краны башенные строительные. Нормы расчета. СКТБ «Стройдормаш». Москва, 1987. 62 с.

24. Іваненко О. І., Крупко І. В., Єрмакова С. О. Теоретичні дослідження стійкості баштового крана з урахуванням розподілу навантажень на опори. *Підйомно-транспортна техніка*. 2020. 3(64). С. 81-95.

25. Іваненко О. І., Щербак О. В., Крупко І. В., Четверіков В. С. Дослідження розподілу опорних навантажень баштового крана за допомогою комп'ютерного моделювання. *Вісник ХНАДУ*. 2023. Вип. 101, т. 1. С.118-125. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.118>.

26. Hric S., Tkac J., Matiskova D., Micko M., Mandulak D. Preliminary analysis of tower crane as a type of truss structure. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 299. Article 03003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929903003>.

27. Jiang W., Ding L., Zhou C. Digital twin: Stability analysis for tower crane hoisting safety with a scale model. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 138. Article 104257. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104257>.

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 10.02.2025 р.

УДК 539.23+621.793.79

РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ ПСЕВДОСПЛАВІВ І ТОНКИХ НАНОКРИСТАЛІЧНИХ ПОКРИТТІВ

Канд. техн. наук, докторант С. А. Князєв, д-р техн. наук В. В. Субботіна,
PhD Г. О. Князева, м. н. с. А. О. Мейлехов, PhD В. А. Рябоштан

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR PRODUCING PSEUDO-ALLOYS AND THIN NANOCRYSTALLINE COATINGS

PhD (Tech.), doctoral student S. Kniaziev, Dr. Sc. (Tech.) V. Subbotina,
PhD (Tech.) H. Kniazieva, PhD (Tech.), junior researcher A. Meilekhov,
PhD (Tech.) V. Riaboshtan

Анотація. У статті розглянуто останні тенденції створення псевдосплавів і нанокристалічних тонких покриттів (плівок). Коротко розглянуто сфери застосування цих матеріалів. Головний акцент зроблено на розгляданні системи вольфрам-мідь і нітридних покриттів, отриманих методами вакуумно-плазмових технологій. Загальною рисою цих груп матеріалів є нерівноважні умови їх отримання з формуванням метастабільного структурного стану.

Ключові слова: псевдосплави, тонкі плівки (покриття), нітридні покриття, багатокомпонентні покриття.

Abstract. The article discusses the latest trends in the creation of pseudo-alloys and nanocrystalline thin coatings (films). The application areas of these materials are briefly reviewed. The main emphasis is placed on the consideration of tungsten-copper and nitride coatings obtained

by vacuum-plasma technologies. It is emphasized that a common feature of these groups of materials is the non-equilibrium conditions of their production with the formation of a metastable structural state. It has been shown that thin films, including nanocrystalline, amorphous, and pseudo-alloys, can be obtained from almost any material, and the applications for thin film coatings are very wide. Thin film deposition in vacuum involves three stages: generation of atoms or molecules, their transfer to a substrate, and film growth on the substrate surface. The composition and structure of the film depend on the starting materials, the method, and the deposition conditions that ensure the required energy and mass transfer of the material. It can be stated that vacuum plasma deposition technologies are the most maneuverable in terms of changing technological parameters. This group of technologies allows for stable results and fully meets the requirements of structural engineering of the surface of modern materials. A variant of classification of coatings by and the following main groups are identified: diamond-like, anti-reflective, antistatic, analytical, decorative, dielectric, indicator, wear-resistant, corrosion-resistant, magnetic, contact, optical, reflective, magneto-optical, semiconductor, enlightening, piezoelectric, resistive, wind-absorbing, superconducting, heat-shielding, solid lubricant, electret.

Keywords: pseudo-alloys, thin films (coatings), nitride coatings, multicomponent coatings.

Вступ. Технології отримання псевдосплавів і тонких нанопокриттів відкривають широкі можливості з їх застосування. Вони перетинаються у сфері методів осадження у вакуумі і мають спільні риси у плані нерівноважності процесів отримання.

Тугоплавкі метали, такі як W, Mo, і перехідні метали, такі як Cu і Ag, використовують для виробництва композитних матеріалів, які поєднують високий опір тугоплавких фаз із високою електро- і теплопровідністю перехідних металів [1-3].

Псевдосплави вольфрам-мідь (W-Cu) використовують у виробництві електроконтактних матеріалів та електродів, терморегулювальних пристроїв, таких як тепловідводи і розподільники, а також провідних чорнил і паст для керамічної металізації [4]. Композитний матеріал W-Cu має підвищену корозійну стійкість, його коефіцієнт термічного розширення (КТР), а також електро- і теплопровідність можна регулювати шляхом зміни його складу. Це дає змогу підібрати КТР для керамічних підкладок, що використовують в електронних пристроях [5]. Механічні властивості, а також теплові та електричні властивості композита переважно залежать

як від мікроструктури та складу, так і методів та умов виготовлення. Сприятливих властивостей зазвичай досягають з розробленням відносно високої щільності та рівномірного розподілу дрібних частинок вольфраму (W) у матриці з міді (Cu) [6, 7]. Крім поліпшення механічних властивостей, зразки з високою щільністю мають вищу теплопровідність, що дуже важливо для застосування сплавів W-Cu в електронній промисловості [8, 9]. Отже, бажано мати можливість виготовляти заготовки зі щільністю, близькою до теоретичної. Одним із нових потенційних застосувань композитів W-Cu є використання їх як компонентів у майбутніх термоядерних установках [10–12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фізико-хімічні властивості W і Cu істотно розрізняються; їхні температури плавлення становлять 3695 і 1358 K, а кристалічні структури – ОЦК і ГЦК відповідно. Атомні радіуси металів відрізняються більш ніж на 20 %, а значення електронегативності 2,36 для W і 1,9 для Cu також різні. За рівноважною фазовою діаграмою, W і Cu не мають взаємну розчинність і не утворюють сполук за жодного складу. Різниця у властивостях металів призводить до складності

отримання композитів W-Cu з однорідної та дрібнозернистої структури. Тому актуальним є розроблення нових технологій для виробництва композитів W-Cu.

Основні методи виготовлення псевдосплавів W-Cu включають інфільтрацію пористого вольфрамового каркаса рідкою міддю [13, 14]. Однак через дуже малу взаєморозчинність системи W-Cu, навіть вище за температуру плавлення міді (1083 °C), ущільнення призводить до неоднорідного розподілу фаз W і Cu у спеченому сплаві [15]. Були запропоновані різні підходи для поліпшення властивостей спікання сплавів W-Cu шляхом розроблення таких технологій: *рідкофазне спікання порошкових сумішей W-Cu* [16, 17], *корундація кисневмісних речовин міді та вольфраму воднем* [18-20], *механічне легування порошків Cu і W* [21], *електролітичне покриття* [22], *метод рідиннофазної плазми* [23], *низькотемпературне ущільнення з використанням спікальних добавок* [24] та ін.

Високопродуктивним для виготовлення композиційних матеріалів W-Cu з різним співвідношенням є метод *саморозповсюджувального високотемпературного синтезу* (СВС) або *синтезу горінням* (СГ). Цей метод використаний для виготовлення еквімолекулярного композиційного порошку W-Cu [25] із використанням термокінетичного підходу [26, 27]. Його суть полягає в поєднанні низькоекзотермічної відновлювальної реакції (наприклад $\text{MeO} + \text{C}$) із висококалорійною ($\text{MeO} + \text{Mg}$) з можливою зміною шляху реакції [27-30].

Крім того, використання комбінованого відновника ($\text{Mg} + \text{C}$) дає змогу контролювати температуру реакції в широкому діапазоні за синтезу композитних порошків W-Cu різного складу.

Використання вихідних порошкових нанокompозитів W-Cu має позитивний вплив на процес ущільнення, що дає змогу формувати щільні W-Cu композити з однорідною субмікрометровою та

нанорозмірною структурою, високою тепло- та електропровідністю, а також гарною механічною міцністю [31-33].

Нанопорошки системи W-Cu можуть бути отримані різними методами [34-37], включаючи відновлення сумішей оксидних сполук металів H_2 у радіочастотній плазмі Ar [38-40] або шляхом електричного вибуху дроту [41]. Плазмохімічний синтез нанопорошків W-Cu має низку переваг: *одностадійність процесу*, *можливість отримання нанопорошків із різним співвідношенням Cu/W*, *відсутність сторонніх металевих домішок*, *відсутність побічних продуктів*, *екологічна чистота і масштабованість*. Сучасна плазмова технологія дає змогу створювати високопродуктивні установки для отримання металевих нанопорошків на основі плазових пальників постійного струму, потужність яких сягає кількох мегават.

На початку 1980-х років з'явилися нові методи виробництва складних деталей із використанням адитивних технологій, засновані на пошаровому нарощуванні порошкового продукту за тривимірною комп'ютерною моделлю під тепловим впливом сфокусованого лазерного або електронно-променевого випромінювання [42-44].

За три десятиліття розвитку адитивні технології дали змогу налагодити промислове виробництво готових функційних виробів із різних металів і сплавів. На сьогодні дослідження показали можливість отримання щільних W-Cu композитів [45-49] методом селективного лазерного плавлення (SLM), що є основою для створення виробничих технологій виготовлення деталей складної форми з композитів W-Cu з необхідними функційними властивостями. Металеві порошки, що використовують під час пошарового виготовлення деталей адитивними методами, повинні мати гарну плинність і забезпечувати максимально можливу щільність упакування частинок у процесі формування порошкових шарів [50,

51]. Ці вимоги можуть бути задоволені з використанням металевих порошків зі сферичними частинками діаметром 20-60 мкм.

Однак композитні порошки W-Cu зі сферичними частинками не виробляють у промислових масштабах. Раніше було запропоновано метод отримання мікропорошків псевдосплавів на основі системи W-Ni-Fe із субмікрометровою структурою і сферичними частинками. Метод включав: 1) плазмохімічний синтез системи W-Ni-Fe нанопорошків у процесі відновлення металевої оксидної суміші під дією H_2 -вмісної термічної плазми, плазмотрона постійного струму; 2) гранулювання композитних нанопорошків системи W-Ni-Fe у розпилювальній сушарці для отримання мікрогранул нанопорошку; 3) класифікацію мікрогранул із виділенням фракції заданого розміру; 4) дугову плазму постійного струму, плазмову сфероїдизацію виділеної цільової фракції мікрогранул і класифікацію сферичних частинок.

В останні десятиліття завдяки своїм величезним перевагам порівняно з традиційним спіканням широко розповсюджено мікрохвильове спікання. Здебільшого вони зумовлені безпосереднім виділенням мікрохвильової енергії в об'єм

матеріалу. Ці переваги, зважаючи на більш високу швидкість нагріву, скорочення часу спікання і споживання енергії, мають велике значення для виготовлення високопродуктивних спечених деталей за низькою ціною [52-54]. На сьогодні інтенсивні дослідження проведені в галузі спікання кераміки, феритів і твердих металів, у яких мікрохвильове спікання наочно демонструє свою здатність підвищувати щільність матеріалів за нижчої температури спікання або меншої тривалості часу [52, 53, 55]. Від першого звіту про мікрохвильове спікання металевих деталей у 1999 році [56] в усьому світі було докладено зусиль у цій галузі, і дотепер кілька груп виконали новаторські та видатні роботи [57-60]. Їхні дослідження показують, що мікрохвильове спікання перевершує звичайне спікання з підвищення щільності спеченого матеріалу і поліпшення мікроструктурної однорідності.

Тонкі плівки, у тому числі і нанокристалічні, аморфні і псевдосплавні, можна отримувати практично з будь-яких матеріалів, а галузі використання тонкоплівкових покриттів мають дуже широкий діапазон. Відомості про застосування тонких плівок наведено в таблиці.

Таблиця

Основні типи, сфери застосування та матеріали тонкоплівкових покриттів

Тип плівки або покриття	Сфера застосування	Матеріал плівки
1	2	3
Алмазоподібна	Електроніка, медицина, машинобудування, зв'язок	$\alpha - C$, $\alpha - C$: H, AlN, ZnO
Антивідблискове	Оптика	SiO ₂ , TiO ₂ , ZnO, SnO ₂ , Ta ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄
Антистатична	Мікроелектроніка	InO, SnO, ZnO
Аналітична	Датчики відносної вологості, медицина	Pt, Ti
Декоративне: на папері, метали, пластмасі, склі, тканинах та ін.	Архітектура, будівництво, поліграфія, промисловість, побутова техніка	Al, Ti, W, Mo, Au, Cr, Cu, Ag, Nb, бронза, латунь
Діелектрична	Мікроелектроніка, електротехніка, зв'язок	SiO, SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃

Продовження таблиці

1	2	3
Індикаторна	Рідкокристалічні індикатори	InSnO
Зносостійке	Машинобудування: пари тертя, різці, фрези, свердла, інструмент для пресування та формування, фільери, валки	TiN, TiCN, TiAlN, AlSi, CrN, NiWO ₄ , WSi, TiN – BN, TiN – NbN – Si ₃ N ₄ , TiN – HfN – BN, AlN, α – C, α – C: H
Корозійностійке	Машинобудування, медицина, електроніка, архітектура, будівництво, побутова техніка	Al, Cu, Cr, Ni, Ti, NiCu, ZnCd, MgNi, α – C, α – CH
Магнітна	Електроніка, зв'язок	CoCr, CoNi, Se, Tb
Металева, контактна, струмопровідна	Мікроелектроніка	Al, Ni, Ta, W, AlSi, PtSi, WSi, PtSi-W-TiW-Al, PtSi-W-TiN-Al
Оптичне	Оптика, оптоелектроніка	Al ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄ , SiO ₂ , TiO ₂ , ZnO, ZnAlO, SnO ₂
Відбивна	Оптика	CoO, CrO-Co, FeO, TiO ₂ , SiO ₂
Оптичне, випромінююче	Оптоелектроніка	CdTe, InSnO, PbSnSe, CaF ₂ , CoSi ₂ , CdHgTe, InP, Y ₃ F ₅ O ₁₂
Магнітооптична	Приладобудування	AlN, GdCo, SmCo
Напівпровідникова	Мікроелектроніка, зв'язок	Si, GaAs, CaF ₂ , InP, B, GaAs _x Al _y , CdGeAs, CuInSe, CdS, CdSe
Просвітлювальне	Оптика	TaO, TiO, WO, AlO
П'єзоелектрична	Функціональна електроніка	AlN, LiNb ₃ , Al, Pd, Au, Ag, Zn, Cu, Ni – Al, SnAl, Fe, Cr – Au, Ni – V
Резистивна	Електроніка, електротехніка, зв'язок	Re, Cr, Ni, NiCr, Au, Al, Ti, Ta, AlW, Ti-Ta-N
Світлопоглинальне	Оптика, енергетика	CuIn ₃ Se ₅
Надпровідна	Електроніка, енергетика	NbN, BaCaCuO, TlBaCaCuO, YbaCuO, BiSrCaCuO
Теплозахисне	Архітектура, будівництво	TiO ₂ -Ag-TiO ₂ , SnO ₂ , SiN, CrN
Твердомастильне	Машинобудування	MoS ₂ , WS ₂ , MoSe ₂ , WSe ₂ , α – C, α – C:H, фторопласт-4
Електретні	Електроніка, медицина	Ta ₂ O ₅

Як видно з таблиці, деякі види плівок мають мультифункційне призначення.

Як підкладку можна використовувати практично будь-які тверді матеріали: напівпровідники, метали, сплави, полімери, скло, кераміку, камінь, дерево, тканини, порошкові матеріали тощо.

Технологічний маршрут нанесення тонкопліткових покриттів складається з таких операцій:

1. Перевірка працездатності обладнання (наявність робочих матеріалів, газів, герметичності вакуумних камер).

2. Завантаження підкладки з атмосфери у вакуум та її переміщення в робочу (технологічну) камеру.

3. Підготовка поверхні підкладки (нагрів, очищення, активація).

4. Вихід на задані режими роботи джерел нанесення тонкоплівкового покриття.

5. Напуск робочого газу (якщо необхідно).

6. Осадження тонкої плівки.

7. Стабілізація та контроль параметрів плівки (нагрів, відпал та ін.).

8. Вивантаження оброблених виробів.

Осадження тонких плівок у вакуумі включає три етапи: генерацію атомів або молекул, перенесення їх до підкладки та зростання плівки на поверхні підкладки. Склад і структура плівки залежать від вихідних матеріалів, методу і режимів нанесення, що забезпечують необхідне енергомасоперенесення матеріалу.

Осадження тонких плівок у вакуумі методом термічного випаровування здійснюється шляхом підведення до речовини енергії резистивним (прямим і непрямим) і високочастотним нагріванням, електронним бомбардуванням, електронно-променевим нагріванням і нагріванням за допомогою лазерного випромінювання. За температури речовини на рівні або вище за $T_{\text{вип}}$ частинки залишають випарник, переносяться у вакуумі на підкладку і конденсуються на її поверхні у вигляді тонкої плівки.

Якщо, крім фізичних процесів, що відбуваються під час осадження тонкої плівки, з напуском у робочу камеру реактивного газу у просторі між джерелом і підкладкою або поверхнею підкладки протікає хімічна реакція, то відповідний метод називають реактивним, наприклад для отримання плівок нітриду титану $2\text{Ti} + \text{N}_2 = 2\text{TiN}$.

До переваг методу осадження тонких плівок термічним випаром належать висока чистота матеріалу, що осаджується (процес проводиться за високого і надвисокого

вакууму), універсальність (наносять плівки металів, сплавів, напівпровідників, діелектриків) і відносна простота реалізації. Обмеженнями методу є нерегульована швидкість осадження V_0 , низька, непостійна і нерегульована енергія частинок E , що осаджуються.

За молекулярно-променевого методу використовують ефузійне джерело як осередок Кнудсена та капілярний випарник, у яких енергію до речовини підводять завдяки резистивному нагріванню. Наявність теплових екранів і контроль температури забезпечують однакову енергію випарених частинок E та ідеальну діаграму розподілу частинок за напрямками (косинусоїдальний закон Кнудсена).

Сутність методу осадження тонких плівок у вакуумі іонним розпиленням полягає у вибиванні (розпорошенні) атомів речовини з поверхневих шарів мішені високоенергетичними іонами робочого газу (зазвичай інертного Ar). Іони утворюються в газовому розряді за тиску $P_{\text{р.г.}} = 10 - 5 \cdot 10^{-2}$ Па і прискорюються до енергії 0,7-5 кеВ внаслідок докладання до мішені негативного потенціалу 0,7-5 кВ. Розпорошені з мішені атоми осаджуються у вигляді тонкої плівки на поверхні підкладки.

Розрізняють іонно-плазмовий і іонно-променевий методи, у яких використано тліючий і несамоствійний газовий розряди, а також автономні джерела іонів Кауфмана (з гарячим катодом) і Пеннінга (з холодним катодом). З використанням робочого газу суміші з Ar і хімічно активного газу (O_2 , N_2 і т. п.) реалізовано реактивний метод осадження оксидів, нітридів тощо. Перевагами методу осадження тонких плівок іонним розпиленням є універсальність (можна наносити метали, сплави, діелектрики, магнітні композиції), регульована швидкість осадження V_0 і відносно проста конструкція. До недоліків належать невисока чистота плівки, що осаджується (через наявність робочого

газу), низька і нерегульована енергія осаджуваних частинок E .

Тонкоплівкові покриття отримують шляхом випаровування речовини вибухом за імпульсного впливу на нього лазерного випромінювання або електронного пучка, а також з пропусканням потужного імпульсу струму через зразок із матеріалу, що наносять у формі тонкого дроту або фольги. Продукти вибуху з великою швидкістю (енергія частинок E становить 1-10 eV) переносяться до підкладки (деталі) і конденсуються на її поверхні у вигляді тонкої плівки. Перевагою методу є висока швидкість осадження V_0 і хороша адгезія тонкоплівкового покриття, проте його застосування обмежене складністю реалізації та великою нерівномірністю товщини плівки.

Осадження тонких плівок дуговим розрядом у вакуумі відбувається за рахунок ерозії речовини сильнопоточних дугових розрядів (з холодним і гарячим катодом), утворення іонізованої парової фази (20-100 % іонів), перенесення її з великою швидкістю (енергія частинок E – до 10 eV) і конденсації на поверхні підкладки. До переваг методу осадження тонких плівок дуговим розрядом у вакуумі належать:

- практично необмежена електрична потужність, високий коефіцієнт іонізації часток, що випаровуються K_i ;

- можливість отримання плівок сплавів, оксидів, нітридів, карбідів тощо, причому як шляхом використання мішеней з цих матеріалів, так і реактивним методом, відсутність потреби в додатковому газі для іонізації;

- швидкість осадження максимально можлива (обмежена допустимим потоком енергії і поверхнею конденсації).

Недоліками є наявність у потоці речовини крапельної фази, що не осаджується, нерегульована енергія частинок E і відносна складність конструкції дугових джерел.

В основі методів іонного осадження тонких плівок лежить поєднання двох

процесів: 1) генерації плазми вихідної речовини за допомогою одного з типів електричного розряду або ВЧ-індуктора, 2) прискорення іонів або всієї квазінейтральної плазми з наступною конденсацією на поверхню підкладки. Вихідну речовину одержують за допомогою одного з методів термічного випаровування (термо-іонний метод); із газової суміші, що містить компоненти плівки, що осаджується (іонно-плазмовий і іонно-променевий методи); за допомогою дугового розряду, який використовують як перший рівень плазмового прискорювача (плазмотронний метод). Основними перевагами методу іонного нанесення тонких плівок є регульована в широких межах енергія осаджуваних частинок E (оптимальною вважають енергію $E_{opt} = 100$ eV) і висока швидкість осадження V_0 , а головними недоліками – складність реалізації і розпилення конструкційних матеріалів, а отже, і забруднення плазми та плівки.

Метод хімічного осадження тонких плівок здійснюється з напуском у робочу камеру (реактор) суміші газів, що містить компоненти отримуваної плівки і ділиться на осадження атомів і молекул безпосередньо з газової фази і плазмо-хімічне осадження електрично нейтральних атомів, молекул і радикалів. Існують CVD-методи, газофазна епітаксія, термічне окиснення, методи плазмо-хімічного осадження. Головними перевагами методу хімічного осадження є широкий діапазон швидкостей осадження V_0 і можливість отримання заданої кристалічної структури плівки (аж до монокристалів), а основним недоліком – використання токсичних, екологічно небезпечних газових сумішей.

Особливістю технології тонких плівок є можливість керувати параметрами тонкоплівкових покриттів за допомогою зміни структури та геометричних розмірів плівки (насамперед товщини), а також її складу. Отримувати плівки із заданим складом можна реактивним нанесенням шляхом використання мішеней складного

складу за допомогою одночасного осадження різних матеріалів із декількох джерел. Реактивним методом можна отримати плівки оксидів, нітридів, карбідів тощо. Умовою стабільності процесу є виконання нерівності $P_{\text{реак}} < P_{\text{кр}}$, де $P_{\text{реак}}$ – порційний тиск реактивного газу; $P_{\text{кр}}$ – критичний тиск, за якого відбувається зміна хімічного складу поверхні мішені, що призводить до помітної зміни режимів осадження плівки (тобто швидкість випаровування або розпилення мішені має бути більшою, ніж швидкість її окиснення, нітридизації тощо). Як приклад можна навести зміну енергії міжатомних зв'язків U_0 матеріалу, що розпилюється, і його оксиду: $U_0(\text{Ti}) = 4,9$ еВ; $U_0(\text{TiO}) = 6,8$ еВ; $U_0(\text{Al}) = 3,2$ еВ; $U_0(\text{Al}_2\text{O}_3) = 19,2$ еВ. Величину $P_{\text{кр}}$ розраховують з умови найбільшої ймовірності здійснення хімічної реакції на підкладці.

За допомогою реактивного осадження наносять, наприклад, плівки ітрієвого ферогранату $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ в середовищі Ar з додаванням 20 % O_2 , причому полікристалічна плівка утворюється за температури підкладки $T = 922$ К, а аморфна за $T < 922$ К; плівки силіцидів металів (для випрямних контактів діодів Шоттки та ін.) MoSi , WSi , PtSi та інших у плазмі Ar-SiH_4 і подальшим спалюванням за $T > 1300$ К; надпровідні плівки NbN (температура надпровідності $T_c = 11-15$ К) з розпиленням мішені з Nb у середовищі Xe-N_2 ; плівки ПАР з AlN на скляній підкладці в середовищі $\text{N}_2\text{-H}_2$; плівки фторопласту-4 з розпиленням мішені з політетрафторетилену з гарним охолодженням із додаванням CF_4 до Ar .

Випаровуванням або розпорошенням мішеней складного складу можна отримувати, наприклад, магнітооптичні плівки GdCo або SmCo , причому в першому випадку склад мішені – 25 % гадолінію і 75 % кобальту, а в другому – 50 % самарію і 50 % кобальту; силіциди тугоплавких металів MoSi , WSi , PtSi і т. п., причому стехіометричні склади плівки та мішені

збігаються, незважаючи на те, що кожен елемент розпорошений окремо, і існує відмінність у коефіцієнтах розпилення компонентів; дисульфід та диселенід металів (тверді мастила), наприклад, MoS_2 , розпорошений цілою молекулою, оскільки зв'язок між атомами сірки та молібдену значно більший за міжмолекулярні зв'язки.

Осадження багатокомпонентних або легованих плівок із декількох джерел, наприклад напівпровідникової плівки Si , легованої Sb , дає змогу отримувати необхідний стехіометричний склад тонкоплівкового покриття, наприклад надпровідної плівки $\text{Nb}_{0,748}\text{Ge}_{0,252}$, суворо керувати рівнем легування (можна отримувати складні профілі легування, надрешітки з практично будь-яким параметром кристала).

У машинобудуванні технологію тонких плівок використовують для підвищення стійкості різального інструменту, зміцнення деформаційного інструменту, зменшення тертя і збільшення зносостійкості деталей машин.

Широкого поширення набуло архітектурне та автомобільне скло з теплозберігаючими тонкоплівковими покриттями, що забезпечують необхідне пропускання видимого світла і високе відбиття в інфрачервоному діапазоні. Цього досягають нанесенням у вакуумі багат шарових покриттів типу «оксид – метал – оксид» товщиною 100-300 нм. Найефективнішим методом нанесення оксидних шарів є магнетронний реактивний на змінному струмі.

Крім теплозахисних покриттів, на склі нанесенням тонких плівок у вакуумі отримують антивідбивні покриття на полімерній плівці, наприклад, для теплиць і оранжерей, а також різні відбивні покриття: дзеркала, призми, рефлектори тощо [61, 62].

Висновки. Із розвитком технологій осадження тонкоплівкових матеріалів, у тому числі і псевдосплавів, для технологів відкриваються великі перспективи щодо варіації технологічних параметрів і

керування метастабільним станом із досягненням нових рівнів характеристик. Можна констатувати, що найбільш маневровими відносно зміни технологічних параметрів є технології вакуумно-плазмового осадження. Ця група технологій дає змогу

отримувати стабільні результати і повною мірою задовольняють вимоги структурної інженерії поверхні сучасних матеріалів.

Робота проведена в рамках держбюджетної теми М1218.

Список використаних джерел

1. Lassner E., Schubert W.-D. Tungsten: properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds, Kluwer Academic. Plenum Publishers, New York, 1999. 447 p.
2. Rieck G. D. Tungsten and its Compounds, Pergamon Press, London, 1967. 148 p.
3. Abu-Oqail A., Ghanim M., El-Sheikh M., El-Nikhaily A. Effects of processing parameters of tungsten–copper composites. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2012. Vol. 35. P. 207-212. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.02.015> (last access: 25.11.2024).
4. Vettivel S. C., Selvakumar N., Leema N., Lenin A. H. Electrical resistivity, wear map and modeling of extruded tungsten reinforced copper composite. *Mater Des.* 2014. Vol. 56 (2). P. 791-806. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.070> (last access: 25.11.2024).
5. Chen P., Luo G., Shen Q., Li M., Zhang L. Thermal and electrical properties of W–Cu composite produced by activated sintering. *Mater Des.* 2013. Vol. 46 (6). P. 101-105. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.034> (last access: 25.11.2024).
6. Zivelonghi A., You J. H. Mechanism of plastic damage and fracture of a particulate tungsten-reinforced copper composite: A microstructure-based finite element study. *Comput Mater Sci.* 2014. Vol. 84. P. 318-326. URL: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.11.067> (last access: 25.11.2024).
7. Chen P., Shen Q., Luo G., Li M., Zhang L. The mechanical properties of W–Cu composite by activated sintering. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2013. Vol. 36. P. 220-224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.09.001> (last access: 25.11.2024).
8. Lee S. H., Kwon S. Y., Ham H. J. Thermal conductivity of tungsten–copper composites. *Thermochim Acta.* 2012. Vol. 542. P. 2-5. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.03.022> (last access: 25.11.2024).
9. Selvakumar N., Vettivel S. C. Thermal, electrical and wear behavior of sintered Cu–W nanocomposite. *Mater Des.* 2013. Vol. 46. P. 16-25. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.055> (last access: 25.11.2024).
10. Tejado E. W–Cu metal matrix composites for next generation fusion devices. *Materials Today.* 2020. Vol. 38. P. 136–137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.07.001> (last access: 25.11.2024).
11. Coenen J, Riesch J., You H. Tungsten composite materials for fusion first wall applications. *Proceedings of the IAEA Fusion Energy Conference. Kyoto, Japan, 2016.*
12. Chong F.L. Development of W/Cu plasma facing component for fusion device. *Materials Science Forum.* 2015. Vol. 809/810. P. 750–756. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.809-810.750> (last access: 25.11.2024).
13. Xu L., Yan M. Xia Y., Peng J., Li W., Zhang L, et al. Influence of copper content on the property of Cu–W alloy prepared by microwave vacuum infiltration sintering. *J Alloys Compd.* 2014. Vol. 592. P. 202-206. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.12.202> (last access: 25.11.2024).

14. Duan L., Lin W., Wang J., Yang G. Thermal properties of W–Cu composites manufactured by copper infiltration into tungsten fiber matrix. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2014. Vol. 46. P. 96–100. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2014.05.022> (last access: 25.11.2024).
15. Kecskes L. J., Klot B. R., Cho K. C., Dowding R. J., Trexler M. D. Densification and structural change of mechanically alloyed W-Cu composites. *Metall Mater Trans A.* 2001. Vol. 32. P. 2885–2893. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-001-1039-0> (last access: 25.11.2024).
16. Ibrahim H., Azizan A., Rahmat A. Enhanced liquid-phase sintering of W–Cu composites by liquid infiltration. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2014. Vol. 43. P. 222–226. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2013.12.004> (last access: 25.11.2024).
17. Xu L., Yan M., Peng J., Srinivasakannan C., Xia Y., Zhang L., et al. Influences of temperatures on tungsten copper alloy prepared by microwave sintering. *J Alloys Compd.* 2014. Vol. 611. P. 34–37. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.05.084> (last access: 25.11.2024).
18. Dorfman L. P., Houck D. L., Scheithauer M. J., Frisk T. A. Synthesis and hydrogen reduction of tungsten–copper composite oxides. *J Mater Res.* 2002. Vol. 17. P. 821–830. URL: <https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0120> (last access: 25.11.2024).
19. Hamada E., Malekzadeh M., Sadrnezhaad S. K. W–15 wt% Cu nanocomposite produced by hydrogen-reduction/sintering of WO₃–CuO nanopowder. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2010. Vol. 28. P. 441–445. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2010.02.002> (last access: 25.11.2024).
20. Fan J., Liu T., Zhu S., Han Y. Synthesis of ultrafine/nanocrystalline W–(30–50) Cu composite powders and microstructure characteristics of the sintered alloys. *Int J Refract Met Hard Mater.* 2012. Vol. 30(1). P. 33–37. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jirmhm.2011.06.011> (last access: 25.11.2024).
21. Meng Y., Shen Y., Chen Ch., Li Y., Feng X. Microstructures and formation mechanism of W–Cu composite coatings on copper substrate prepared by mechanical alloying method. *Appl Surf Sci.* 2013. Vol. 282. P. 757–764. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.06.049> (last access: 25.11.2024).
22. Huang L. M., Luo L. M., Ding X. Y., Luo G. N., Zan X., Cheng J. G., et al. Effects of simplified pretreatment process on the morphology of W–Cu composite powder prepared by electroless plating and its sintering characterization. *Powder Technol.* 2014. Vol. 258. P. 216–221. URL: <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2014.03.027> (last access: 25.11.2024).
23. Lee H., Park S. H., Seo S. G., Kim S. J., Kim S. Ch., Park Y. K., et al. Preparation and characterization of copper nanoparticles via the liquid phase plasma method. *CurrentNanosci.* 2014. Vol. 10. P. 7–10. URL: <http://dx.doi.org/10.2174/1573413709666131111221741> (last access: 25.11.2024).
24. Zhang L., Chen W., Luo G., Chen P., Shen Q., Wang C. Low-temperature densification and excellent thermal properties of W–Cu thermal-management composites prepared from copper-coated tungsten powders. *J Alloys Compd.* 2014. Vol. 588. P. 49–52. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.003> (last access: 25.11.2024).
25. Kirakosyan H. V., Aydinyan S. V., Kharatyan S. L. Composite W-Cu powders obtained by joint reduction of oxides in combustion mode. *Int J SHS.* 2016. Vol. 25. P. 215–223. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1061386216040051> (last access: 25.11.2024).
26. Merzhanov A. G. Thermally coupled SHS reactions. *Int J SHS* 2011. Vol. 20. P. 61–63. URL: <http://dx.doi.org/10.3103/S1061386211010109> (last access: 25.11.2024).
27. Kharatyan S. L., Merzhanov A. G. Coupled SHS reactions as a useful tool for synthesis of materials: an overview. *Int J SHS.* 2012. Vol. 21. P. 59–73. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1061386212010074> (last access: 25.11.2024).

28. Aydinyan S. V., Kirakosyan H. V., Kharatyan S. L. Cu-Mo composite powders obtained by combustion-coreduction process. *Int J Ref Met Hard Mater.* 2016. Vol. 54. P. 455-463. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.09.002> (last access: 25.11.2024).
29. Kirakosyan H. V., Minasyan T. T., Niazyan O. M., Aydinyan S. V., Kharatyan S. L. DTA/TGA study of CuO and MoO₃ co-reduction by combined Mg/C reducers. *J Therm Anal Calor.* 2016. Vol. 123. P. 35-41. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/jcs5120318> (last access: 25.11.2024).
30. Shiryayev A. A. Thermodynamic of SHS: modern approach. *Int J SHS.* 1995. 4:3. P. 51-62.
31. Hou C., Song X. Y., Tang F. W., Li Y. R., Cao L. J., Wang J., Nie Z. R. W-Cu composites with submicron- and nano-structures: Progress and challenges. *NPG Asia Materials.* 2019. Vol. 11. P. 74. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41427-019-0179-x> (last access: 25.11.2024).
32. Fan J. L., Liu T., Zhu S., Han Y. Synthesis of ultrafine/nanocrystalline W-(30-50)Cu composite powders and microstructure characteristics of the sintered alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2012. Vol. 30. P. 33-37. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.06.011> (last access: 25.11.2024).
33. Tsakiris V., Lungu M., Enescu E., Pavelescu D., Dumitrescu G., Radulian A., Mocioi N. Nanostructured W-Cu electrical contact materials processed by hot isostatic pressing. *Acta Physica Polonica A.* 2014. Vol. 125. P. 348-352. URL: <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.125.348> (last access: 25.11.2024).
34. Dong L. L., Chen W. G., Hou L. T., Deng N., Zheng C. H. W-Cu system: Synthesis, modification, and applications. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* 2017. Vol. 56. P. 171-184. URL: <https://doi.org/10.1007/s1106-017-9884-6> (last access: 25.11.2024).
35. Chen A. Q., Huo W. T., Dong L. L., Chen W. G., Zhou Y. Recent advance of copper tungsten composite materials [J]. *Materials China.* 2021. Vol. 40 (2). P. 152-160. URL: <https://doi.org/10.7502/j.issn.1674-3962.202002006> (last access: 25.11.2024).
36. Wang Y. L., Zhuo L. C., Yin E. H. Progress, challenges and potentials/trends of tungsten-copper (W-Cu) composites/pseudo-alloys: Fabrication, regulation and application. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials.* 2021. Vol. 100. P. 105648. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105648> (last access: 25.11.2024).
37. Lungu M. V. Synthesis and processing techniques of tungsten copper composite powders for electrical contact materials: A review. *Oriental Journal of Chemistry.* 2019. Vol. 35(2). P. 491-515. URL: <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/350201> (last access: 25.11.2024).
38. OH J W, NA H, CHO Y S, CHOI H. In situ synthesis of bimetallic tungsten-copper nanoparticles via reactive radio-frequency (RF) thermal plasma. *Nanoscale Research Letters.* 2018. Vol. 13. P. 220. URL: <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2623-1> (last access: 25.11.2024).
40. Kobayashi N., Kawakami Y., Kamada K., Li J. G., Watanabe T., Ishigaki T. Spherical submicron-size copper and copper-tungsten powders prepared in RF induction thermal plasma. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy.* 2007. Vol. 54. P. 39-43. URL: <https://doi.org/10.2497/jjspm.54.39> (last access: 25.11.2024).
41. Li X. J., Hu P., Wang J. S., Chen S. Q., Zhou W. Y. In situ synthesis of core-shell W-Cu nanopowders for fabricating full-densified and fine-grained alloys with dramatically improved performance. *Journal of Alloys and Compounds.* 2021. Vol. 853. P. 156958. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156958> (last access: 25.11.2024).
42. Pervikov A. V., Lozhkomoev A. S., Dvilis E. S. Synthesis of W-Cu composite nanoparticles by the electrical explosion of two wires and their consolidation by spark plasma sintering. *Materials Research Express.* 2019. 6(12). P. 126519. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab715b> (last access: 25.11.2024).
43. Bandyopadhyay A., Bose S. Additive manufacturing. 2nd ed. New York: CRC Press. 2019. 484 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9780429466236> (last access: 25.11.2024).

44. Froes F. H., Boyer R. Additive manufacturing for the aerospace industry. Amsterdam: Elsevier, 2019.
45. Milewski J. O. Additive manufacturing of metals: From fundamental technology to rocket nozzles, medical implants, and custom jewelry. Berlin: Springer, 2017.
46. Tan C. L., Zhou K. S., Kuang T. C. Selective laser melting of tungsten-copper functionally graded material[J]. *Materials Letters*. 2019. Vol. 237. P. 328–331. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.127> (last access: 25.11.2024).
47. Li R. D., Shi Y. S., Liu J. H., Xie Z., Wang Z. G. Selective laser melting W–10wt.%Cu composite powders. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 48. P. 597–605. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2304-4> (last access: 25.11.2024).
48. Song C. H., Yang Y. Q., Liu Y., Luo Z. Y., Yu J. K. Study on manufacturing of W–Cu alloy thin wall parts by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 78. P. 885–893. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6689-3> (last access: 25.11.2024).
49. Gu D. D., Shen Y. F., Wu X. J. Formation of a novel W-rim/Cu-core structure during direct laser sintering of W–Cu composite system. *Materials Letters*. 2008. Vol. 62. P. 1765–1768. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.09.087> (last access: 25.11.2024).
50. Qian M. Metal powder for additive manufacturing. *JOM*. 2015. Vol. 67. P. 536–537. URL: <https://doi.org/10.1007/S11837-015-1321-Z> (last access: 25.11.2024).
51. Saheb S. H., Durgam V. K., Chandrashekhar A. A review on metal powders in additive manufacturing. *Proceedings of the Third International Conference on Inventive Material Science Applications. Coimbatore, India*. 2020. 2281. 020018. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0026203> (last access: 25.11.2024).
52. Bykov Yu. V., Rybakov K. I., Semenov V. E. High-temperature microwave processing of materials. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. Vol. 34 (13). R55. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/34/13/201> (last access: 25.11.2024).
53. Cheng J. P., Agrawal D. K., Komarneni S., Mathis M., Roy R. Microwave processing of WC-Co composites and ferroic titanates. *Mater. Res. Innovations*. 1(1997). P. 44-52. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s100190050017> (last access: 25.11.2024).
54. Wong W. L. E., Gupta M. Improving overall mechanical performance of magnesium using nano-alumina reinforcement and energy efficient microwave assisted processing route. *Adv. Eng. Mater.* 2007. Vol. 9. P. 902. URL: <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/85300> (last access: 25.11.2024).
55. Wielage B., Krause H., Leparoux S., Lampke T., Buryan M. Sintern von Keramik in einem gasbeheizten Ofen mit Mikrowellenunterstützung. *Gaswärme International*, Vol. 51 (2002) No.8, P. 342-347.
56. Roy R., Agrawal D., Cheng J., Gedevarishvili S. Full sintering of powder metal bodies in a microwave field. *Nature*. 1999. Vol. 399. P. 668-670. URL: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=134816> (last access: 25.11.2024).
57. Anklekar R.M., Bauer K., Agrawal D.K., Roy R. Improved mechanical properties and microstructural development of microwave sintered copper and nickel steel PM parts *Powder Metall.* 2005. Vol. 48. pp. 39-46. URL: <https://doi.org/10.1179/003258905X37657> (last access: 25.11.2024).
58. Gupta M., Wong W.L.E. Enhancing overall mechanical performance of metallic materials using two-directional microwave assisted rapid sintering. *Scripta Mater.* 2005. Vol. 52. pp. 479-483. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.11.006> (last access: 25.11.2024).
59. Takayama S., Link G., Sato M., Thumm M., AIChE Annual Meeting, Austin. 2004. pp. 485.

60. Perelaer J., B.-J. de Gans, Schubert U.S. Ink-jet Printing and Microwave Sintering of Conductive Silver Tracks. *Adv. Mater.* 2006. Vol. 18. pp. 2101-2104. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.200502422> (last access: 25.11.2024).

61. Vladioiu R., Mandesa A., Dinca V., Tichy M., Kudrna P., Ciobotaru C.C., Polosan S. Versatile techniques based on the Thermionic Vacuum Arc (TVA) and laser-induced TVA methods for Mg/Mg:X thin films deposition-A review. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2024. Vol. 12. pp. 3115–3134. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2024.08.012> (last access: 25.11.2024).

62. Khondoker Safin Kaosar Saad, Tasfia Saba, Adib Bin Rashid Application of PVD coatings in medical implantology for enhanced performance, biocompatibility, and quality of life. Review article. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. pp. e35541. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35541> (last access: 25.11.2024).

Князев Сергій Анатолійович, кандидат технічних наук, докторант кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0001-6422-3658.

Тел.: +380988699114. E-mail: obmeninfo@ukr.net.

Субботіна Валерія Валеріївна, доктор технічних наук, професор кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0002-3882-0368.

Тел.: +380679332068. E-mail: subbotina.valeri@gmail.com.

Князева Ганна Олександрівна, PhD, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0002-5290-7566. Тел.: +380963790108.

E-mail: annapostelnik@ukr.net.

Мейлехов Андрій Олександрович, молодший науковий співробітник кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0002-8142-6024.

Тел.: +380986079460. E-mail: meilekhov@gmail.com.

Рябоштан Валентин Анатолійович, PhD, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0001-5826-5085. Тел.: +380937786946.

E-mail: obibobbivalkinobi@gmail.com.

Kniaziev Sergey, candidate of technical sciences, doctoral student of the Department of Materials Science of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" ORCID iD: 0000-0001-6422-3658.

Тел.: +380988699114. E-mail: obmeninfo@ukr.net

Subbotina Valeria, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials Science of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" ORCID iD: 0000-0002-3882-0368. Тел.: +380679332068.

E-mail: subbotina.valeri@gmail.com

Kniazieva Hanna, PhD, Associate Professor of the Department of Materials Science of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" ORCID iD: 0000-0002-5290-7566. Тел.: +380963790108.

E-mail: annapostelnik@ukr.net

Meylekhov Andriy, Junior Researcher, Department of Materials Science, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" ORCID iD: 0000-0002-8142-6024. Тел.: +380986079460. E-mail: meilekhov@gmail.com

Ryaboshtan Valentyn, PhD, Associate Professor of the Department of Materials Science of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" ORCID iD: 0000-0001-5826-5085. Тел.: +380937786946.

E-mail: obibobbivalkinobi@gmail.com

Статтю прийнято 03.03. 2025 р.

УДК 629.341

ЛОКАЛЬНЕ ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

Кандидати техн. наук Н. О. Лалазарова, Г. Л. Комарова, О. В. Афанасьєва, О. Г. Попова

LOCAL SURFACE STRENGTHENING OF HIGH-DUCTILE CAST IRON

PhD (Tech.) N. Lalazarova, PhD (Tech.) G. Komarova, PhD (Tech.), O. Afanasieva,
PhD (Tech.) O. Popova

Анотація. У роботі подано метод підвищення зносостійкості поршневих кілець із високоміцного чавуну, який включає нормалізацію і поверхневе зміцнення. Порівняно режими зміцнення чавуну: об'ємне гартування, лазерне гартування з оплавленням, лазерне гартування УФ-випромінюванням. Показано ефективність поверхневого зміцнення високоміцного чавуну малопотужними УФ-лазерами за імпульсного режиму зі збереженням високої якості поверхневого шару.

Ключові слова: високоміцний чавун, лазерне гартування, випромінювання в УФ-діапазоні, зносостійкість.

Abstract. Piston rings work in extreme conditions of high temperatures, abrasive friction, high thermomechanical stress, oil starvation and aggressive environmental influences. The purpose of the work is to develop a method of increasing the wear resistance of piston rings made of high-strength cast iron due to the use of volumetric thermal annealing in combination with surface hardening by laser hardening with a low-power laser. The structure was studied using an optical microscope. Microhardness was measured on a PMT-3 microhardness tester. Wear is investigated using the roller-pad method on a friction machine. High-strength cast iron was subjected to normalization in order to ensure the required level of mechanical properties in cross-section. Laser technologies are used for surface strengthening of high-strength cast iron. A comparison of cast iron hardening regimes was carried out: volume hardening, laser hardening with melting, laser hardening with UV radiation. The study showed that cast iron has the highest hardness after quenching from the liquid state, less – after quenching with laser radiation in the UV range with a wavelength of $\lambda = 0.355 \mu\text{m}$, cast iron has the lowest hardness after bulk quenching. It was found that during laser hardening with UV radiation, the depth of the hardened layer depends on the initial microstructure, which is probably related to the different thermal conductivity of the microstructures. The pearlite-ferrite structure of cast iron after normalization has a higher thermal conductivity than the structure of martensite formed after volume hardening. For samples with a martensite structure, the energy of the laser beam provides heating to quenching temperatures at a greater depth. Hardening of high-strength cast iron with a UV laser ensures the formation of a finely dispersed martensite structure, increasing the hardness and wear resistance by 2 times while maintaining the quality of the surface layer.

Key words: high-strength cast iron, laser hardening, radiation in the UV range, wear resistance.

Вступ. Головний вузол двигуна внутрішнього згоряння – циліндропоршнева група (ЦПГ), функціонування якої визначає

ефективність роботи двигуна в цілому. Відповідальними деталями ЦПГ є поршневі кільця, які працюють в умовах тертя за

циклічних навантажень і підвищених температур і наявності абразивних частинок, корозійної дії хімічних сполук, що утворюються зі згорянням паливно-повітряної суміші [1].

Зважаючи на умови роботи кільця повинні мати такі властивості: низьке тертя, щоб уникнути суттєвих втрат потужності двигуна, високу зносостійкість і опір термомеханічній втомі, хімічним навантаженням і гарячій корозії. Поршневе кільце не має викликати надмірний знос циліндра, інакше значно скорочується термін служби двигуна, експлуатаційна надійність і витрати палива протягом усього часу експлуатації.

Залежно від функцій, які вони виконують, поршневі кільця поділяють на компресійні, маслоснімні і компресійно-маслоснімні. Компресійні поршневі кільця призначені для запобігання прориву газів між поршнем і стінками циліндра в картер. Прорив відпрацьованих газів, що мають високу температуру, між поршнем і стінкою циліндра може забезпечити зниження потужності, інтенсивне нагрівання деталей і припинення змащування. Усе це зменшує термін служби двигуна, знижує ефективність його роботи [2].

Через екстремальні умови функціонування поршневі кільця часто виходять із ладу, що може призвести до поломки всього двигуна. Тому підвищення зносостійкості поршневих кілець – один із ефективних способів забезпечення безвідмовної роботи ДВЗ.

Проблему підвищення зносостійкості поршневих кілець вирішують шляхом використання сучасних конструкційних матеріалів, технологій їх обробки та поверхневого зміцнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для виготовлення поршневих кілець використовують різні конструкційні матеріали: сталь, бронзу, сірий чавун із пластинчастим графітом і високоміцний чавун із кулястим графітом (ВЧКГ).

Високоміцний чавун із кулястим графітом, що має високий рівень експлуатаційних властивостей, можна застосовувати для виготовлення поршневих кілець ДВЗ.

ВЧКГ має достатньо високий рівень міцності, твердості, ударної в'язкості та зносостійкості. Такий комплекс властивостей можна забезпечити модифікуванням, термічною обробкою і легуванням, різними методами поверхневого зміцнення [3, 4].

Проблема підвищення зносостійкості поршневих кілець пов'язана з їхньою конструкцією. Кільця мають невелику площину перерізу, що потребує використання методів, які не впливають на короблення виробу. Тому для підвищення зносостійкості необхідні технології з коротким часом дії високих температур або низькотемпературним хіміко-термічним впливом.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою є розроблення методу підвищення зносостійкості поршневих кілець із високоміцного чавуну за рахунок використання термічної обробки в поєднанні з поверхневим зміцненням – лазерним гартуванням малопотужними лазерами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вивчити умови роботи поршневих кілець, особливості їхньої конструкції, структуру і властивості чавуну після об'ємної термічної обробки та поверхневого лазерного гартування.

Основна частина дослідження. Дослідження проводили на високоміцному чавуні хімічного складу: 3,3 – 3,8 % С; 2,4 – 3,2 % Si; $C + 1/3 Si = 4,25 - 4,35$ %; 0,004 – 0,007 % S; 0,5 – 0,9 % Mn; 0,045 – 0,008 % P; 0,05 – 0,1 % Cr; 0,1 – 0,15 % Ni; 0,04 – 0,09 % Mg. У структурі чавуну включення графіту глобулярної форми середнього розміру 30-60 мкм. Щільність графітних включень – 80-90 мм².

У литому стані мікроструктура чавуну являє собою перліт, ферит у вигляді

облямівки навкруги включень графіту і кулясті графітні включення.

Чавун у литому стані має високий ступінь неоднорідності як структурної, так і хімічної, спостерігають ліквідацію хімічних елементів, а саме кремнію. Усе це не дає змогу отримати високий рівень механічних властивостей ($210\text{--}220\text{ HBW}$, $\delta = 3\%$, $KCU = 15\text{ Дж/см}^2$). Для вивчення структури використовували оптичний мікроскоп. Мікротвердість досліджували на мікротвердомірі ПМТ-3.

Для забезпечення оптимального рівня механічних властивостей за перерізом високоміцний чавун піддавали нормалізації за таким режимом: нагрів до температури 860°C , витримування за цієї температури протягом 1,5 години, охолодження в струмені повітря від вентилятора ($275\text{--}285\text{ HBW}$, $\delta = 3\%$, $KCU = 50\text{ Дж/см}^2$). Після нормалізації структура чавуну – дрібнодисперсна перліто-феритна (рис. 1). Чавун також піддавали об'ємному гартуванню за таким режимом: нагрів до температури 860°C , витримування за цієї температури протягом 1,5 години, охолодження в оливі. Структура чавуну – мартенсит і залишковий аустеніт.

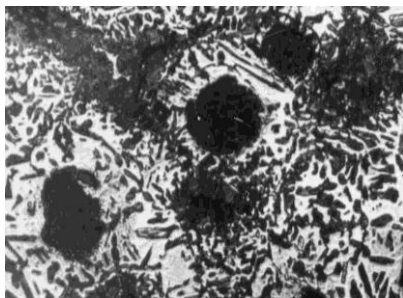


Рис. 1. Мікроструктура високоміцного чавуну після нормалізації, $\times 450$

Для поверхневого зміцнення виробів із високоміцного чавуну використовують лазерні технології. Лазерні промислові технології засновані на тепловій дії лазерного випромінювання на зміцнюваний

матеріал, при цьому на поверхні і в об'ємі матеріалу можуть розвиватися різні фізичні процеси [5]. За лазерного гартування необхідно забезпечити нагрів вище температури фазових перетворень, вище або нижче температури плавлення. Якщо гартування виконують із твердого стану, то в цьому випадку вдається зберегти геометричні і якісні характеристики поверхні.

Порівняли такі режими зміцнення: об'ємне гартування (1), гартування променем Nd:YVO₄-лазера потужністю 5 Вт із довжиною хвилі $\lambda = 1,06\text{ мкм}$ (2), що працює в імпульсному режимі (обробка одиночними імпульсами), та гартування променем Nd:YVO₄-лазера з довжиною хвилі $\lambda = 0,355\text{ мкм}$ (3), яка забезпечена за рахунок генерації третьої гармоніки. Малопотужні лазери раніше не застосовували для поверхневого зміцнення сталей і чавунів. У цьому випадку використання таких лазерів пояснено тим, що зміцнюють поверхневий шар малої площини.

У роботі [6] показано, що ІЧ-лазером із довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,06\text{ мкм}$ не вдалося зміцнити без оплавлення поверхні. На рис. 2 наведений вигляд поверхні чавуну після лазерного гартування ІЧ-лазером.

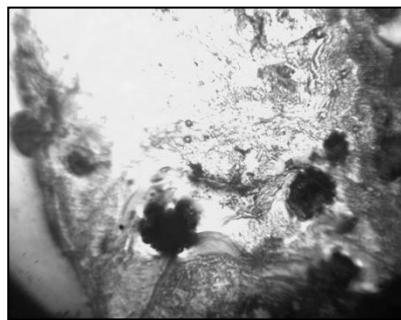


Рис. 2. Лазерне зміцнення високоміцного чавуну з оплавленням поверхневого шару

Мікротвердість поверхні, зміцненої гартуванням із рідкого стану, – $H_{100} = 9300\text{--}$

9500 МПа. Середня мікротвердість чавуну після об'ємного гартування та відпуску – $H_{100} = 6300$ МПа. Мікротвердість чавуну після гартування випромінюванням в УФ-діапазоні – 8000 МПа (рис. 3).

Мікротвердість зразків після гартування УФ-випромінюванням нижче, ніж із рідкого стану, проте набагато вище, ніж після об'ємної термічної обробки.

Це свідчить про ефективність лазерного гартування УФ-випромінюванням. Якість поверхневого шару після лазерного гартування УФ-випромінюванням не змінюється, на відміну від гартування з рідкого стану (з оплавленням). Така поверхня потребує чистової обробки після лазерного гартування.

Дослідження мікроструктури зразків із високоміцного чавуну за допомогою електронного мікроскопа показали, що мартенсит, який утворюється з гартуванням УФ-випромінюванням, має більш дисперсну структуру, ніж після об'ємного гартування (рис. 4).

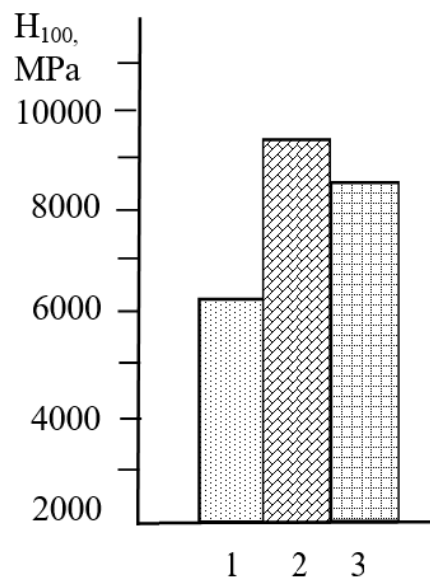
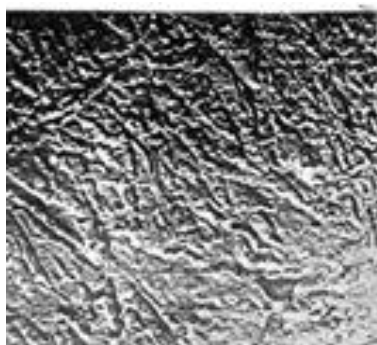
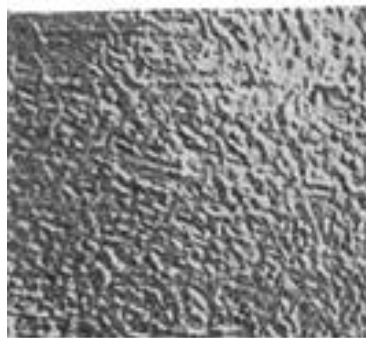


Рис. 3. Мікротвердість чавуну після різних видів гартування:

1 – об'ємне гартування; 2 – лазерне гартування з оплавленням; 3 – лазерне гартування УФ-випромінюванням



а



б

Рис. 4. Мікроструктура ВЧКГ після об'ємного гартування (а); лазерного гартування УФ-випромінюванням (б), $\times 10000$

Можна припустити, що оптимізація режимів гартування УФ-випромінюванням може забезпечити отримання поверхневих наноструктур.

Товщина зміцненого УФ-випромінюванням шару на нормалізованому чавуні складає 0,1-0,15 мм. Розподіл мікротвердості за глибиною наведений на рис. 5.

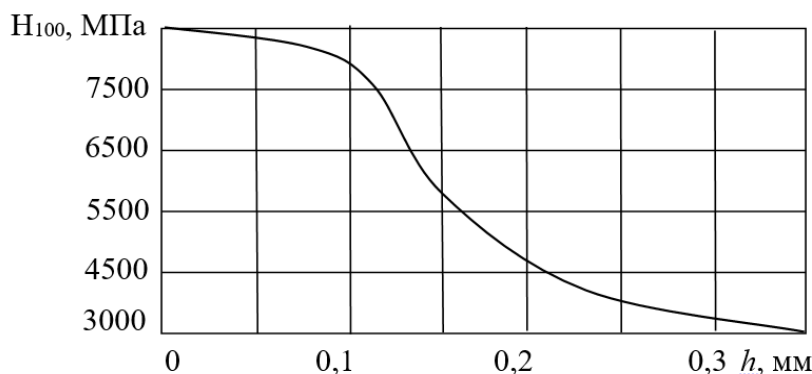


Рис. 5. Розподіл мікротвердості шару, зміцненого лазерним гартуванням УФ-випромінюванням за глибиною

У роботі досліджено вплив вихідної мікроструктури чавуну на характеристики загартованого шару. Встановлено, що за лазерного гартуванням УФ-випромінюванням глибина зміцненого шару досить сильно залежить від вихідної мікроструктури чавуну, що пов'язано, імовірно, з різною теплопровідністю мікроструктур. Перліто-феритна структура

чавуну після нормалізації має більшу теплопровідність, ніж структура мартенситу, що утворюється після об'ємного гартування.

Для зразків із структурою мартенситу енергія лазерного променя забезпечує нагрівання до гартівних температур на більшу глибину (глибина зміцненого шару 0,15-0,2 мм) (рис. 6).

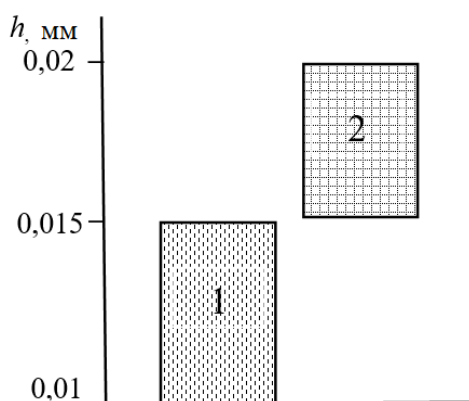


Рис. 6. Вплив вихідної мікроструктури на глибину зміцненого шару:
1 – ВЧКГ після нормалізації; 2 – ВЧКГ після об'ємного гартування

А з обробкою зразка з перліто-феритною структурою енергія випромінювання розсіюється вглиб матеріалу за рахунок більшої теплопровідності (глибина зміцненого шару 0,1-0,15 мм).

Тобто для отримання більш глибокого зміцненого шару лазерну обробку високоміцних чавунів можна проводити на готових деталях, що пройшли попереднє об'ємне гартування. Така обробка дасть

змогу отримати структуру із меншою теплопровідністю.

Об'ємна термічна обробка високоміцного чавуну і лазерне гартування УФ-випромінюванням забезпечують суттєве збільшення твердості і зносостійкості поверхневого шару.

Для підтвердження ефективності запропонованих зміцнювальних технологій проведені зносні випробування. Порівнювали зносостійкість високоміцного чавуну в нормалізованому стані, після об'ємного гартування, після нормалізації та лазерного гартування УФ-випромінюванням. Зразки, які загартовували лазерною обробкою з рідкого стану, не випробували

на зносостійкість, оскільки якість їхнього поверхневого шару незадовільна.

Випробування на тертя і зношування проводили за схемою «ролик-колодка» на машині тертя СМЦ-2. Пару тертя для високоміцного чавуну після термічної обробки і поверхневого зміцнення складав чавун СЧ20, з якого виготовляють гільзу циліндрів. Величину зносу контртіл – ролика і колодки – визначали ваговим методом із точністю до 0,1 міліграма на електронних вагах. Кожне випробування проводили протягом 10 годин і повторювали два рази.

Результати зносних випробувань наведені в таблиці.

Таблиця

Результати випробувань на зносостійкість

Стан чавуну і вид обробки	Знос, мг
1. ВЧКГ після нормалізації	0,0064
2. ВЧКГ після об'ємного гартування	0,004
3. ВЧКГ після нормалізації та лазерного гартування УФ-випромінюванням	0,003

Аналіз зносних випробувань показав, що найкращі результати отримано після нормалізації та лазерного гартування УФ-випромінюванням. У цьому випадку спостерігають суттєве зниження зносу – більш ніж у два рази відносно ВЧКГ після нормалізації.

Отже, комбінована обробка, яка складається з нормалізації і лазерного гартування УФ-випромінюванням, може бути рекомендована для підвищення зносостійкості поршневих кілець із високоміцного чавуну зі збереженням високої якості поверхневого шару.

Висновки. На основі виконаних досліджень можна зробити висновок про можливість поверхневого зміцнення високоміцного чавуну малопотужними УФ-лазерами за імпульсного режиму.

Лазерне гартування УФ-випромінюванням підвищує твердість і зносостійкість чавуну і не змінює якість поверхні виробу, на відміну від лазерного гартування з рідкого стану. Оскільки продуктивність такого процесу низька, це дає змогу рекомендувати використання цього виду обробки для локального зміцнення деталей або інструменту.

Встановлено, що попередня зміцнювальна об'ємна термічна обробка – гартування – дає змогу отримати більш глибокий зміцнений шар після лазерного зміцнення порівняно з чавуном після нормалізації через різницю в теплопровідності перліто-феритної і мартенситної структур.

Список використаних джерел

1. Andrzej Wolff, Grzegorz Koszałka. Influence of engine load on piston ring pack operation of an automotive IC engine. *Combustion Engine*, s. 2022. 190(3). 88-94. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-141737>.
2. Semih Genculu P. E. Cast Irons: Properties and Applications. URL: https://www.cabww.com/uploads/case_studies/CastIronProp-wp.pdf.
3. Research and Analysis of the Effect of Heat Treatment on Damping Properties of Ductile Iron / Zhang, Yu, Guo, Erjun, Wang, Liping, Feng, Yicheng, Zhao, Sicong and Song, Meihui. *Open Physics*. 2019. Vol. 17. No. 1. P. 566-574.
4. Laser Remelting of Ductile Cast Iron to Achieve a Graphite-Free Surface Layer for Enabling a Manual High-Gloss Finish / Laura Kreinest, Johannes Schüssler, Onur Özaydin, Sujith Kochuthundil Subhash, Edgar Willenborg and Andreas Bührig-Polaczek. *Metals*. 2024. 14. 347. P. 1-14. <https://doi.org/10.3390/met14030347>.
5. Lewin Rathmann, Tim Radel. Influence of laser hardening on laser induced periodic surface structures on steel substrates. 2021. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1135 012024.
6. New Technologies of Laser Hardening of Parts of Fuel Equipment / O. S. Hnatenko, O. V. Afanasieva, N. O. Lalazarova, Yu. S. Kurskoy, E. N. Odarenko, Y. V. Sashkova, O. V. Ivanchenko. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2023. Vol. 15. No 1. P. 1-7. [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(1\).01007](https://doi.org/10.21272/jnep.15(1).01007).

Лалазарова Наталія Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Тел.: +38 (095) 390-38-16. E-mail: lalaz1932@gmail.com.

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Тел.: +38 (067) 999-85-77. E-mail: anna.kom3793@gmail.com.

Афанасєва Ольга Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Тел.: +38 (096) 525-62-35. E-mail: 7584839@ukr.net.

Попова Олена Георгіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства, Харківський національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852+38>. Тел.: +38 (067) 570-12-17. E-mail: o.popova@khai.edu.

Lalazarova Nataliia, PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Tel.: +38 (095) 390-38-16. E-mail: lalaz1932@gmail.com.

Komarova Hanna, PhD, Associate Professor, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Tel.: +38 (067) 999-85-77. E-mail: anna.kom3793@gmail.com.

Afanasieva Olga, PhD, Associate Professor, Physical Foundations of Electronic Engineering Department, National University of Radio Electronics. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Tel.: +38(096)-525-62-35. E-mail: 7584839@ukr.net.

Popova Olena, PhD, Associate Professor, Department of Composite Structures and Aviation Materials, Kharkiv National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852+38>. Tel.: +38 (067) 570-12-17. E-mail: o.popova@khai.edu/.

Статтю прийнято 03.03.2025 р.

УДК 621.225

ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION CONTROL OF HYDRAULIC TRANSMISSION SYSTEMS

Postgraduate student Xu MingWei, postgraduate student Wang XueFeng,
Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, PhD (Tech.) O. Ovchynnikov,
postgraduate student T. Tryfonov, postgraduate student Y. Orliuk

КЕРУВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЄЮ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ СИСТЕМ ГІДРАВЛІЧНИХ ТРАНСМІСІЙ

Аспіранти Щю Мінвей, Ван Сюефен, д-р техн. наук С. В. Воронін,
канд. техн. наук О. О. Овчинников, аспіранти Т. В. Трифонов, Ю. К. Орлюк

Abstract. This paper investigates the energy consumption optimization control of hydraulic transmission systems. By analyzing the working principles and energy consumption characteristics of hydraulic systems, an energy consumption optimization control strategy based on dynamic modeling and optimization algorithms is proposed. The effectiveness of the proposed method is verified through mathematical modeling and simulation analysis, and the correctness of the theoretical analysis is further validated by experimental data. The results show that the optimization control strategy can significantly reduce the energy consumption of hydraulic systems, providing theoretical support for the design and application of hydraulic transmission systems.

Keywords: hydraulic transmission system; energy consumption optimization; dynamic modeling; optimization control; simulation analysis.

Анотація. У статті досліджено метод керування оптимізацією енергоспоживання систем гідравлічної трансмісії технологічних машин. Проаналізовано принципи роботи і характеристики енергоспоживання гідравлічних систем об'ємних силових передач до трансмісій, вказавши на основні джерела енергоспоживання системи та необхідність їхньої оптимізації за цим критерієм. Запропоновано математичну модель гідронасоса для визначення його продуктивності з урахуванням робочого циклового об'єму, непродуктивних витрат рідини по зазорах, номінального та максимального тиску, динамічну математичну модель гідроциліндра, яка записана як рівняння руху поршня зі штоком і враховує масу навантаження на шток, об'єм поршня, площу поршня, тиск подавання та повернення поршня, коефіцієнт демпфування. Розроблені моделі покладено в аналіз симуляції роботи простої гідросистеми, виконаної в середовищі Simulink/SimHydraulics. На основі проведеного аналізу симуляції запропоновано стратегію управління оптимізацією гідросистеми за критерієм мінімуму енерговитрат з одночасним забезпеченням продуктивності системи на рівні, що відповідає вимогам фактичних робочих умов. Розроблено алгоритм оптимізації на основі генетичного алгоритму, основні етапи якого включають ініціалізацію популяції, оцінювання функції відповідності, операції відбору, кросінговеру та мутації. Реалізація процесу оптимізації відбувалася на основі отриманих залежностей для визначення енергоспоживання насоса та гідроциліндра. Для перевірки ефективності запропонованої стратегії оптимізації енергоспоживання побудовано платформу моделювання на основі Simulink/SimHydraulics. На платформі моделювання створено модель системи, включаючи гідравлічні насоси, гідроциліндри, регулюючі клапани та інші елементи, відповідно до

структури та параметрів фактичної системи гідравлічної трансмісії. Для подальшої перевірки точності результатів моделювання розроблено план і здійснено експериментальну перевірку моделі.

Ключові слова: система гідравлічної передачі, оптимізація енергоспоживання, динамічне моделювання, контроль оптимізації, аналіз моделювання.

1. Introduction

1.1. Research Background and Significance

Hydraulic transmission systems, known for their high power density, rapid response, and precise control capabilities, are widely used in industrial fields such as construction machinery, aerospace, and automotive manufacturing. However, significant energy consumption issues arise during the operation of these systems, primarily manifested as energy leakage, pressure loss, and low system efficiency. With the intensification of the energy crisis and the increasing demands for environmental protection, reducing the energy consumption of hydraulic systems has become an urgent problem to solve [1, 3]. Energy consumption optimization not only helps reduce operating costs but also reduces environmental pollution and enhances the overall performance and reliability of the system. Therefore, research on energy consumption optimization control of hydraulic transmission systems holds significant theoretical and practical importance [1, 2, 6].

1.2. Domestic and International Research Status

In recent years, scholars both domestically and internationally have conducted extensive research on the energy consumption optimization of hydraulic systems. International research has mainly focused on system modeling, optimization algorithms, and intelligent control strategies, such as optimization control based on genetic algorithms, fuzzy control, and adaptive control [2]. Domestic research, on the other hand, has emphasized the analysis of system energy consumption and the application of energy-saving technologies, such as the use of variable-frequency speed control technology and load-sensitive control technology [5, 6]. However,

most existing research has concentrated on single optimization methods, lacking systematic research on energy consumption optimization under complex working conditions. Therefore, developing a comprehensive energy consumption optimization control strategy that combines dynamic modeling and advanced optimization algorithms is a current research hotspot and challenge [2, 3, 5].

1.3. Research Content and Innovations

This paper aims to study the energy consumption optimization control strategy of hydraulic transmission systems. By establishing a dynamic mathematical model of the system, an optimization control strategy based on optimization algorithms is proposed, and its effectiveness is verified through simulation and experimentation [5, 6, 8]. The innovation of this paper lies in the combination of dynamic modeling and optimization algorithms to propose a comprehensive energy consumption optimization control strategy [1, 2, 5, 6].

2. Working Principles and Energy Consumption Characteristics of Hydraulic Transmission Systems

2.1. Basic Components of Hydraulic Transmission Systems

Hydraulic transmission systems consist of power elements, executive elements, control elements, and auxiliary elements [4]. Power elements (such as hydraulic pumps) convert mechanical energy into hydraulic energy, executive elements (such as hydraulic cylinders and hydraulic motors) convert hydraulic energy into mechanical energy, control elements (such as various valves) regulate the pressure, flow, and direction in the hydraulic system, and auxiliary elements (such as reservoirs, filters, and pipes) support the normal operation of the system. The coordinated operation of these

elements enables hydraulic systems to achieve efficient power transmission and precise motion control. However, each element experiences energy losses during operation, such as volumetric efficiency losses in hydraulic pumps, leakage losses in hydraulic cylinders, and pressure losses along pipes, which directly affect the system's energy consumption [2, 4, 5, 7, 8].

2.2. Energy Consumption Analysis of Hydraulic Systems

The energy consumption of hydraulic systems mainly originates from several aspects: First is the energy consumption of power elements. The input power of a hydraulic pump is proportional to its displacement, speed, and working pressure, but actual operation involves volumetric and mechanical efficiency losses [1]. Second, executive elements also consume energy during operation. The energy consumption of a hydraulic cylinder mainly depends on the load size and movement speed, while the energy consumption of a hydraulic motor depends on its speed and torque. Additionally, control and auxiliary elements cause energy losses, such as pressure losses in various valves and frictional resistance along pipes [3]. By analyzing these energy consumption factors, an energy consumption model of the system can be established to provide a theoretical basis for subsequent optimization control [6, 8].

2.3. Necessity and Challenges of Energy Consumption Optimization

With the growing demand for energy and the increasing strictness of environmental protection requirements, reducing the energy consumption of hydraulic systems has become an important direction for the development of hydraulic technology [2, 4]. Energy consumption optimization can not only reduce the operating costs of the system and improve energy utilization efficiency but also reduce environmental pollution, in line with the requirements of sustainable development [1, 3]. However, energy consumption optimization of hydraulic systems faces many challenges. First, the working conditions of hydraulic systems are

complex and variable. Changes in load size, movement speed, and working pressure all affect the system's energy consumption [5]. Second, the intercoupling relationships among various elements in the system make the energy consumption optimization problem complex, requiring a comprehensive consideration of the overall system performance [7]. Moreover, existing optimization methods often suffer from high computational complexity and slow convergence speeds, making it difficult to meet the demands of practical engineering applications [2, 6]. Therefore, developing an efficient and practical energy consumption optimization control strategy is of great significance for improving the energy utilization efficiency of hydraulic systems [2, 7, 8].

3. Dynamic Modeling of Hydraulic Transmission Systems

3.1. Establishment of Mathematical Models

Dynamic modeling of hydraulic transmission systems is the foundation of energy consumption optimization control [2, 5]. By analyzing the physical characteristics of each element in the system, mathematical models can be established [6]. The mathematical model of a hydraulic pump can be expressed as:

$$Q = Vn(1 - \frac{V_s}{V})(1 - \frac{P}{P_{max}}) \quad , \quad (1)$$

where Q – is the flow rate;

V – is the working volume;

n – is the speed;

V_s – is the leakage volume;

P – is the working pressure;

P_{max} – is the maximum pressure.

The dynamic model of a hydraulic cylinder can be expressed as:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = A_p(P_s - P_b) - f \frac{dx}{dt} \quad , \quad (2)$$

where m – is the load mass;

x – is the piston displacement;

A_p – is the piston area;

P_s and P_b – are the supply and return pressures of the cylinder, respectively;

f – is the damping coefficient.

Through these models, the dynamic behavior of the hydraulic system can be accurately described, providing theoretical support for subsequent optimization control [4, 5, 7, 8].

3.2. Dynamic Characteristics Analysis

The dynamic characteristics analysis of hydraulic systems mainly includes system stability, response speed, and energy consumption characteristics [1, 3]. System stability analysis can be carried out through eigenvalue analysis to determine whether the system remains stable under various working conditions [5]. Response speed analysis is conducted through step response or pulse response tests to evaluate the system's rapidity and accuracy in response to input signals. Energy consumption characteristics analysis is performed through simulation and experimental data to assess the system's energy consumption under different working conditions [2, 6]. For example, by using the Simulink/SimHydraulics module for simulation analysis, the energy consumption changes of the system under different load and pressure conditions can be intuitively observed. These analysis results provide an important basis for the formulation of optimization control strategies [3, 7, 8].

3.3. Model Validation and Parameter Identification

Model validation is a crucial step to ensure the accuracy and reliability of mathematical models [6]. By comparing simulation results with experimental data, the accuracy of the model can be verified. Parameter identification involves adjusting the parameters in the model based on experimental data to make the model more closely resemble the actual system. Common parameter identification methods include the least squares method and genetic algorithms [2, 4]. For instance, using the least squares method to

identify the leakage volume V_s of the hydraulic pump and the damping coefficient f of the hydraulic cylinder can significantly improve the accuracy of the model. Through model validation and parameter identification, the mathematical model can accurately reflect the actual operating conditions of the hydraulic system, providing a reliable theoretical basis for subsequent optimization control [3, 5].

4. Energy Consumption Optimization Control Strategy

4.1. Optimization Objectives and Constraints

The core objective of the energy consumption optimization control strategy is to reduce the energy consumption of the hydraulic system while ensuring that the system's performance meets the requirements of actual working conditions. The optimization objective can be expressed as:

$$\min E = \int_0^T P(t) \cdot dt, \quad (3)$$

where E – is the total energy consumption of the system;

$P(t)$ – is the instantaneous power of the system at time t ;

T – is the working cycle.

To achieve this objective, the following constraints need to be considered: the system pressure P must be maintained within the set range to ensure the normal operation of the hydraulic cylinder; the flow rate Q should be dynamically adjusted according to the load demand; and the system's response speed and stability must also meet the requirements of actual working conditions. These constraints ensure that the optimization process is carried out within a feasible range in practice, avoiding system performance degradation due to excessive optimization [1, 4, 5, 7].

4.2. Selection and Design of Optimization Algorithms

To achieve energy consumption optimization control, selecting an appropriate optimization algorithm is crucial. Genetic

Algorithm (GA), known for its strong global search capability and adaptability to complex optimization problems, has been widely applied in the energy consumption optimization of hydraulic systems. GA simulates the process of natural selection to iteratively optimize solutions and ultimately find the global optimal solution. In this study, a GA-based optimization algorithm has been designed, with the main steps including: population initialization, fitness function evaluation, selection operations, crossover operations, and mutation operations [1, 3, 5, 6]. The fitness function is designed based on the optimization objective, such as:

$$\text{Fitness} = \frac{1}{E} \quad (4)$$

Through multiple iterations, GA can gradually approach the optimal solution, thereby minimizing energy consumption. Additionally, to enhance optimization efficiency, adaptive crossover and mutation rates have been introduced to improve the convergence speed and stability of the algorithm [6].

4.3. Implementation of Control Strategy

The energy consumption optimization control strategy based on the optimization algorithm is realized by dynamically adjusting

the operating parameters of the hydraulic system. Specifically, the controller adjusts the speed of the hydraulic pump, the flow rate, and the pressure of the hydraulic cylinder according to the current system state and the output of the optimization algorithm [2, 4]. For example, by using variable-frequency speed control technology to adjust the speed of the hydraulic pump, it can meet the load demand while minimizing energy consumption as much as possible. By using load-sensitive control technology to adjust the flow rate and pressure of the hydraulic cylinder, it can adapt to different working conditions [1, 4, 6]. The implementation of the control strategy requires the combination of advanced sensor technology and real-time control systems to ensure the accuracy and real-time performance of optimization control. Through simulation and experimental verification, the control strategy can significantly reduce the system's energy consumption while maintaining good system performance [2, 8].

4.4. Calculation Formulas and Optimization Process

In the optimization process, calculation formulas are the key to achieving energy consumption optimization. For example, the energy consumption calculation formula for a hydraulic pump is:

$$E_{\text{pump}} = \int_0^T P_{\text{pump}}(t) \cdot dt = \int_0^T Q(t) \cdot P(t) \cdot dt \quad (5)$$

where $P_{\text{pump}}(t)$ – is the instantaneous power of the hydraulic pump;

$Q(t)$ – is the flow rate;

$P(t)$ – is the pressure.

By adjusting the flow rate and pressure through the optimization algorithm, the energy consumption of the hydraulic pump can be effectively reduced. The energy consumption calculation formula for a hydraulic cylinder is:

$$E_{\text{cylinder}} = \int_0^T P_{\text{cylinder}}(t) \cdot dt = \int_0^T F(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (6)$$

where $P_{\text{cylinder}}(t)$ – is the instantaneous power of the hydraulic cylinder;

$F(t)$ – is the load force;

$v(t)$ – is the piston velocity.

By adjusting the load force and piston velocity through the optimization control strategy, the energy consumption of the hydraulic cylinder can be reduced. Through these calculation formulas and optimization algorithms, the energy consumption optimization control of the hydraulic system has been realized [2, 4, 6-8].

5. Simulation and Experimental Verification

5.1. Simulation Platform Construction and Parameter Settings

To verify the effectiveness of the proposed energy consumption optimization control strategy, a simulation platform based on Simulink/SimHydraulics has been constructed. Simulink/SimHydraulics is a powerful tool for modeling and simulating hydraulic systems, capable of accurately simulating the dynamic behavior of hydraulic systems under various working conditions [2, 3, 5]. In the simulation platform, a system model including hydraulic pumps, hydraulic cylinders, control valves, and other elements has been established according to the structure and parameters of the actual hydraulic transmission system [1]. The simulation parameters are set as follows: The displacement of the hydraulic pump is $V = 10 \text{ cm}^3/\text{rev}$, the speed is $n = 1500 \text{ rpm}$, the piston area of the hydraulic cylinder is $A_p = 50 \text{ cm}^2$, the load mass is $m = 500 \text{ kg}$, and the working pressure range of the system is from $P_{\min} = 5 \text{ MPa}$ to $P_{\max} = 20 \text{ MPa}$. With these parameter settings, the simulation platform can truly reflect the operating conditions of the hydraulic system, providing a reliable testing environment for the verification of the optimization control strategy [2].

5.2. Simulation Results Analysis

On the simulation platform, hydraulic systems with and without the optimized control strategy were tested through simulation. The results indicate that the optimized control strategy can significantly reduce the system's energy consumption [3, 6]. Under the optimized control strategy, the system's energy consumption is significantly lower than that of the unoptimized system under various load

conditions. For instance, under the maximum load condition, the optimized system's energy consumption was reduced by approximately 30 %. Moreover, the optimized control strategy also enhanced the system's response speed and stability. The response time of the optimized system was shortened by about 20 %, and the overshoot was reduced by about 15 %. These results demonstrate that the optimized control strategy not only effectively reduces energy consumption but also significantly improves the system's dynamic performance [5, 7].

5.3. Experimental Design and Data Acquisition

To further verify the accuracy of the simulation results, an experimental verification plan has been designed [2, 6]. The experimental platform uses an actual hydraulic transmission system with a structure and parameters consistent with the simulation model. During the experiment, data such as system pressure, flow rate, and displacement are collected through sensors and transmitted to a computer for real-time processing and analysis via a data acquisition card. The experiment is divided into two parts: one part is the energy consumption test without the optimization control strategy, and the other part is the energy consumption test with the optimization control strategy [4]. The load conditions and operating parameters of the system are kept consistent with the simulation test during the experiment to ensure the comparability of the experimental results. Through the acquisition and analysis of experimental data, the effectiveness of the optimization control strategy in practical applications can be verified [4, 8].

5.4. Experimental Results and Discussion

The experimental results (Fig. 1) demonstrate that the optimized control strategy also achieves significant energy-saving effects in practical hydraulic transmission systems [1]. Consistent with the simulation results, the system's energy consumption under the optimized control strategy is significantly reduced under various load conditions. For instance, under the maximum load condition, the experimentally measured energy

consumption was reduced by approximately 32 %, which is basically in line with the simulation results. Moreover, the experiments also verified the optimized control strategy's improvement on the system's dynamic performance [1, 7]. The optimized system's

response time was shortened by about 22 %, and the overshoot was reduced by about 18 %, which is in accordance with the simulation results. These experimental results further prove the effectiveness and reliability of the optimized control strategy [5].

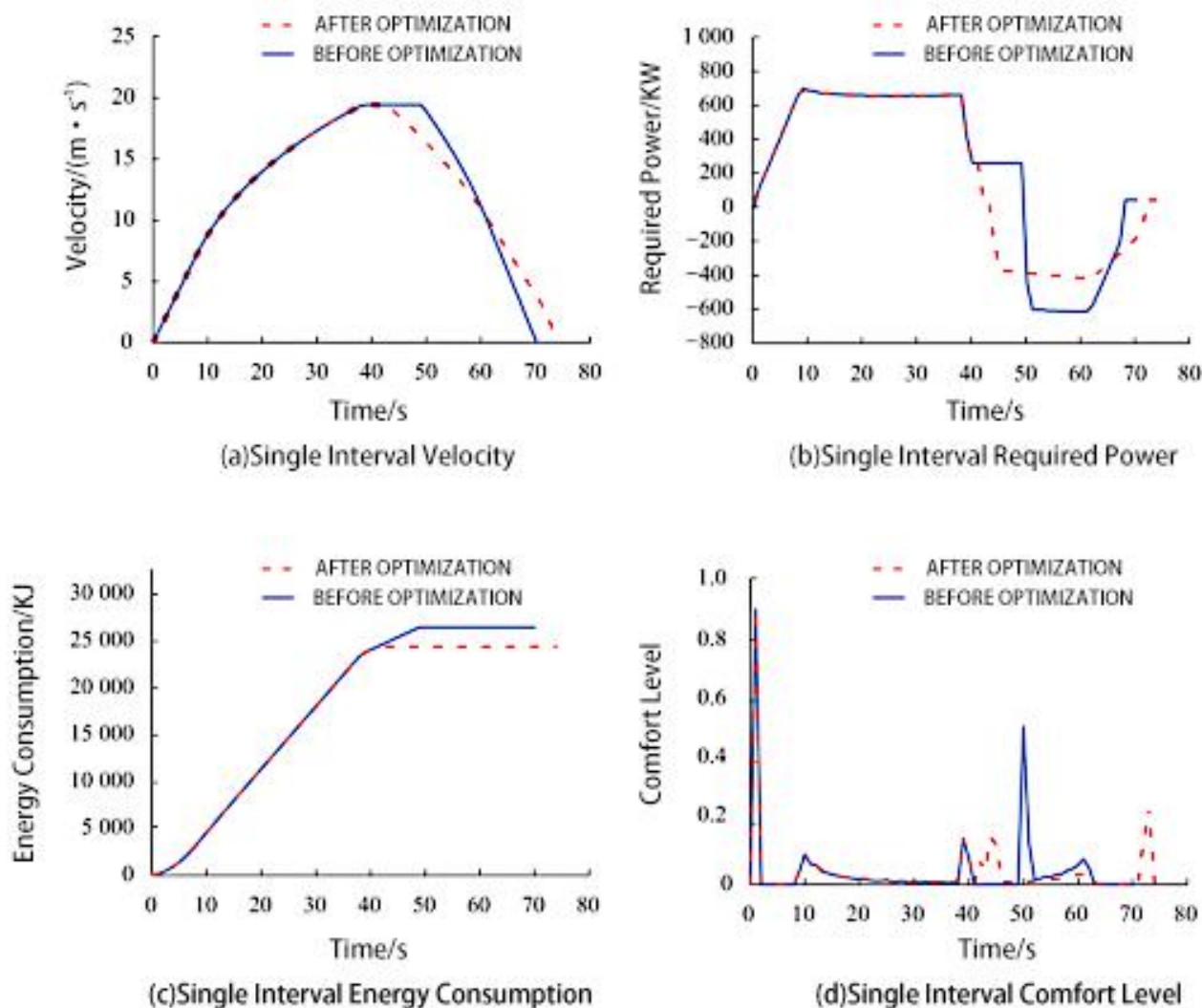


Fig. 1. The experimental results

Through the analysis of the simulation and experimental results, the following conclusions can be drawn: The proposed energy consumption optimization control strategy based on dynamic modeling and optimization algorithms can significantly reduce the energy consumption of hydraulic

systems and improve the dynamic performance of the system. The strategy shows good energy-saving effects and performance improvements in both simulation and experiments, with high practical application value. However, some issues that need further research were also found in the experiment, such as the

convergence speed of the optimization algorithm still having room for improvement under certain complex working conditions, and the impact of parameter changes in the actual system on the optimization control strategy. These issues will be further explored in subsequent research [2, 4, 5, 8].

6. Conclusions and Future Work

6.1. Research Summary

This paper has carried out a series of research work on the energy consumption optimization control problem of hydraulic transmission systems. First, the working principles and energy consumption characteristics of hydraulic systems were analyzed, pointing out the main sources of system energy consumption and the necessity of optimization [3, 6]. Then, a dynamic mathematical model of the hydraulic system was established, and the accuracy of the model was verified through simulation and experimentation. Based on this, an energy consumption optimization control strategy based on dynamic modeling and optimization algorithms was proposed, and its effectiveness was verified through simulation and experimentation. The results show that the optimization control strategy can significantly reduce the energy consumption of hydraulic systems while improving the dynamic performance of the system, with high practical application value. This study provides theoretical support and practical guidance for the energy-saving optimization of hydraulic transmission systems [1, 3, 7].

6.2. Research Innovations

The innovations of this paper are mainly reflected in the following aspects: First, the dynamic and energy consumption characteristics of the hydraulic system were comprehensively considered to establish a more accurate system mathematical model [1, 8]. Second, an energy consumption optimization control strategy based on genetic algorithms was proposed, which dynamically adjusts the operating parameters of the system to achieve effective energy consumption reduction. Third, the effectiveness and reliability of the optimization control strategy were verified through a combination of simulation and experimentation, providing strong support for practical applications [2, 5].

6.3. Future Work Outlook

Although this study has achieved certain results, there are still some issues that need further research. For example, the convergence speed of the optimization algorithm still has room for improvement under complex working conditions, and the impact of parameter changes in the actual system on the optimization control strategy needs to be further analyzed. In addition, applying the optimization control strategy to different types and scales of hydraulic systems to verify its universality and adaptability is also a focus of future work. In the future, more advanced optimization algorithms and control technologies will be explored to further improve the energy consumption optimization level of hydraulic systems.

References

1. Yiyue Zhang. Design and Optimization Analysis of Mechanical Hydraulic System Based on ANSYS Workbench. *Journal [J] Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024. Vol. 9, Iss. 1. DOI: 10.2478/AMNS-2024-1670.
2. Dudziński Piotr, Skurjat Aleksander. Impact of Hydraulic System Stiffness on Its Energy Losses and Its Efficiency in Positioning Mechanical Systems. *Journal [J] Energies*. 2022. Vol. 15, Iss. 1. P. 294-294. DOI: 10.3390/EN15010294.
3. Weiping Wang, Xinyi Zhou, Shun Lu. Auxiliary variable-based output feedback control for hydraulic servo systems with desired compensation approach. *Journal [J] Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2025. Vol. 47, Iss. 4. P. 760-770. DOI: 10.1177/01423312241267061.

4. Yan Xiaopeng. Energy optimization of main hydraulic system in a forging press by simulation and experimental methods. *Journal [J] Energy*. 2023. Vol. 277. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2023.127620.
 5. de Lima Edimar. Influence of the hydraulic press system on advanced high-strength steel formability. *Journal [J] The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 127, Iss. 1-2. P. 615-624. DOI: 10.1007/S00170-023-11578-9.
 6. Ryszard Dindorf. Dynamic Modeling and Simulation of a Discrete Incremental Hydraulic Positioning System Controlled by Binary Valves. *Journal [J] Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, Iss. 7. DOI: 10.3390/APP14072973.
 7. Victoria Erofeeva. Multilevel modeling and control of dynamic systems // *Journal [J] Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, Iss. 1. P. 27903-27903. DOI: 10.1038/S41598-024-79279-1.
 8. Lisowski Edward. Analysis of the Energy Efficiency Improvement in a Load-Sensing Hydraulic System Built on the ISO Plate. *Journal [J] Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 20. P. 6735-6735. DOI: 10.3390/EN14206735.
-

Щю Мінвей, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0001-9165-1014. Тел.: +38(057)730-10-72. E-mail: xu@kart.edu.ua.

Ван Сюефен, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0007-9800-7962. Тел.: +38(057)730-10-72. E-mail: wang@kart.edu.ua.

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Овчинніков Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1194-4387. Тел.: +38(057)730-10-59. E-mail: ovchynnikov@kart.edu.ua.

Трифонов Тарас Вікторович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0006-1415-8767. Тел.: +38(050)401-45-48. E-mail: ttrifonov81.tt@gmail.com.

Орлюк Юрій Костянтинович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0001-1004-490X. Тел.: +38(067)923-14-85. E-mail: orlyuk525@gmail.com.

Xu Mingwei, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0001-9165-1014. Tel.: +38(057)730-10-72. E-mail: xu@kart.edu.ua.

Wang Xuefeng, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0007-9800-7962. Tel.: +38(057)730-10-72. E-mail: wang@kart.edu.ua.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Tel.: +38 (095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Ovchynnikov Oleksandr, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1194-4387. Tel.: +38(057)730-10-59. E-mail: ovchynnikov@kart.edu.ua.

Tryfonov Taras, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0006-1415-8767. Tel.: +38(050)401-45-48. E-mail: ttrifonov81.tt@gmail.com.

Orliuk Yurii, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0001-1004-490X. Tel.: +38(067)923-14-85. E-mail: orlyuk525@gmail.com.

Статтю прийнято 10.03.2025 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 621.224:621.311.21

ТУРБИНИ ГВИНТОВОГО ТИПУ: ІННОВАЦІЇ В БУДІВНИЦТВІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Аспірант О. В. Герба

SCREW-TYPE TURBINES: INNOVATIONS IN ENERGY FACILITY CONSTRUCTION

Postgraduate student O. V. Herba

***Анотація.** Турбіни гвинтового типу відіграють важливу роль у розвитку сучасних енергетичних установок. Їхні унікальні конструктивні рішення забезпечують оптимальне використання потоків води або повітря, що проходять через турбіну, підвищуючи ефективність, порівняно зі шнековими аналогами. У статті розглянуто основні конструктивні особливості гвинтових турбін і їхній потенціал для впровадження в будівництво енергетичних об'єктів.*

Особливу увагу приділено перевагам гвинтових турбін, де завдяки продуманому дизайну вони демонструють більшу ефективність для перетворення кінетичної енергії рідин і газів у механічну обертальну енергію. Це забезпечує оптимальні умови для роботи в умовах малих перепадів висот (від 1 м) і низьких витрат потоків (від 0,5 м³/с).

Акцент зроблено на покращених експлуатаційних характеристиках турбін гвинтового типу порівняно з традиційними шнековими аналогами. Подано результати досліджень, які підтверджують ефективність нового дизайну лопатей із виїмками в корпусі. Така конструкція сприяє природному руху рідини та повітря відповідно до теорії Шаубергера. Особливості дизайну, включно з формуванням виїмок у корпусі, дають змогу оптимізувати потік, зменшити тертя і підвищити обертальний момент. Крім того, завдяки маховиковому ефекту гвинтові турбіни здатні накопичувати енергію, забезпечуючи стабільну роботу, зменшуючи механічні коливання в системі.

У статті також розглянуто можливості застосування гвинтових турбін у будівництві енергетичних об'єктів, зокрема малих гідроелектростанцій. Запропоновані рішення сприяють підвищенню ефективності використання природних ресурсів у змінних умовах навколишнього середовища. Подальші дослідження будуть спрямовані на детальніше вивчення ефективності цих нововведень і адаптацію конструкції до різних експлуатаційних умов. Це підкреслює важливість і доцільність застосування гвинтових турбін у сучасному будівництві та енергетиці.

***Ключові слова:** гвинтова турбіна, енергетичні установки, будівництво, гідроенергетика, ефективність, надійність.*

***Abstract.** Screw-type turbines play a significant role in the development of modern energy systems. Their unique design features ensure optimal utilization of water or air flows passing through the turbine, enhancing efficiency compared to screw-type analogs. This article examines the primary design characteristics of screw turbines and their potential for integration into energy facilities construction. Special attention is given to the advantages of screw turbines, where, due to their*

thoughtfully conceived design, they demonstrate higher effectiveness in converting kinetic energy from liquids and gases into mechanical rotational energy. This design provides optimal operating conditions for applications involving low head differences (from 1 meter) and low flow rates (starting from $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$). The focus is on the enhanced operational characteristics of screw-type turbines compared to traditional screw analogs.

Research results confirming the efficiency of the new blade design incorporating notches in the housing are presented. This construction aids in the natural movement of fluids and air in line with the principles of Schauburger's theories. The design features, including the formation of notches in the housing, facilitate the optimization of flow, reduce friction, and increase torque. Additionally, thanks to the flywheel effect, screw turbines are capable of energy storage, ensuring stable operation while minimizing mechanical vibrations within the system. The article also explores the application possibilities of screw turbines in the construction of energy facilities, particularly small hydroelectric power plants.

Proposed solutions contribute to the improved efficiency of utilizing natural resources under varying environmental conditions. Future research will focus on a more in-depth assessment of the efficiency of these innovations and the adaptation of turbine designs for various operational settings. This underscores the importance and feasibility of employing screw turbines in contemporary construction and energy sectors. By adopting these advanced turbine designs, we can accelerate the transition to more sustainable energy solutions while maximizing the effectiveness of renewable energy sources. The integration of screw turbines offers a promising approach towards achieving greater energy efficiency and environmental sustainability in modern infrastructure projects.

Keywords: screw turbine, energy systems, hydropower, fluid dynamics, efficiency, renewable energy, sustainability.

Вступ. У сучасній енергетиці велику увагу приділяють розробленню ефективних і надійних технологій для надійного виробництва електричної енергії. Турбіни є основними компонентами в багатьох енергетичних установках, включаючи гідроелектростанції, вітрові турбіни, а також теплові електростанції.

Для роботи з малими перепадами (від 1 м) і витратами води (від $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ на одну турбіну) зазвичай використовують шнекові турбіни [1]. Однією з переваг шнекової турбіни є висока ефективність роботи (більше 80 %) за малої швидкості обертання вала. Діапазон потужності складає від 10 до 650 кВт [2].

Поліпшеним типом шнекових турбін є спіралеподібні турбіни [3], які привертають увагу завдяки своїм унікальним конструкційним особливостям, що сприяють підвищенню ефективності та надійності. Спіралеподібні турбіни, які мають спеціальну геометрію лопатей, нерухомо з'єднаних із корпусом,

підвищують ефективність перетворення енергії. Вони здатні працювати в широкому діапазоні умов і знижувати вібраційні навантаження, що сприяє їхній довговічності. Після досліджень спіралеподібних турбін, спрямованих на вдосконалення і покращення їхньої аеродинаміки та експлуатаційних характеристик, виникли варіанти оптимізації геометрії турбін.

Передумови та особливості проєктування гвинтових турбін. Під час проведення дослідів у трьох режимах повітряного потоку трьох модифікацій турбін зі спіралеподібними лопатями була помічена закономірність підвищення ефективності за рахунок збільшення ваги корпусу. Виник задум вдосконалити найкращий варіант серед раніше запропонованих спіралеподібних турбін [3] шляхом поліпшення конструкції за умови збереження принципу їхньої роботи. Лопаті турбіни, розташовані під кутом до вхідного потоку, створюють обертальний момент

відносно осі обертання та одночасно перенаправляють потік до корпусу турбіни. Завдяки будові корпусу з поступовим збільшенням об'єму в напрямку руху потоку створюється додаткова реактивна тяга. При цьому буде забезпечений найбільший обертальний момент, що також дає змогу значно знизити необхідну для страгування турбіни швидкість водного чи повітряного потоку [3].

Ідея турбіни гвинтового типу направлена на вдосконалення спіралеподібної турбіни, у якій шляхом зміни конструкції, дизайну та форми можна досягти збільшення об'єму корпусу та поступового відведення потоку (рідини, газу) від більшого діаметра корпусу на вході до меншого діаметра корпусу на виході з турбіни [4]. Використання досвіду спіральних заокруглень Шаубергера [5] призводить до зменшення природного гальмування (тертя) опору реактивному руху за рахунок конструктивних криволінійних (заокруглених) заглиблень (виїмок) у корпусі. Зростання швидкості потоку (води, газу або іншого робочого тіла) дає змогу збільшити ККД установки.

Конструктивні аспекти та конфігурація турбіни гвинтового типу. Як і в моделях спіралеподібних турбін [3], гвинтові лопаті турбіни розташовані у вигляді спіралі і нерухомо з'єднані з корпусом і розташовані так, що максимально перекривають безперешкодний рух потоку, тим самим значно збільшуючи тиск на них, при цьому додано конструкційні криволінійні виїмки в корпусі, які є ніби продовженням лопатей. Для створення виїмок поступово збільшують площу поперечного перерізу турбіни до виходу, що дає змогу збільшити вагу корпусу. Збільшення ваги корпусу дає змогу гвинтовій турбіні працювати з ефектом маховика [6], щоб накопичувати, зберігати і віддавати енергію, згладжуючи коливання в роботі механічної системи разом із генератором. Такі модифікації сприяють створенню природних завихрень

потоку, який не спричиняє опору (гальмування), стабілізують і зменшують нерівномірності обертання вала з генератором, відповідно збільшуючи ККД усієї установки.

На рис. 1 зображено турбіну гвинтового типу в розрізі А-А, на рис. 2 подано вигляд турбіни гвинтового типу зверху, на рис. 3 – вигляд турбіни гвинтового типу знизу, на рис. 4 показано ізометрію турбіни гвинтового типу з розрізом В-А [7].

Турбіна гвинтового типу має корпус 1 із конструктивними виїмками 2, нерухомо зв'язаний щонайменше однією гвинтоподібною лопаттю 3 у середині турбіни з конусним валом 4 (рис. 1) [7].

Технічного результату досягли шляхом утворення в середині турбіни проточних каналів $S'-S1'$; $S''-S1''$; $S'''-S1'''$ (рис. 1-3), що містять виїмки заокругленої форми в корпусі на межі злиття з гвинтоподібною лопаттю 2, 2', 2'', 2''' (рис. 4), з поступовим зменшенням площі проходження потоку до виходу $\Delta S > \Delta S1$ (рис. 1-3), також площа потоку зменшується за рахунок конусної форми вала 4, що дає змогу збільшити потужність установки, використовуючи додатковий перепад тиску на турбіні, фізично посилюючи динамічну взаємодію, яка відбувається за рахунок збільшення кількості і швидкості рідини (повітря), яка природно проходить через турбіну завдяки конструкційним особливостям (виїмкам). При цьому глибина закруглення (виїмки) 2 у корпусі 1 – найменша на вході в турбіну, поступово збільшується до виходу, де корпус товщий, стаючи – 2''', а поступове зростання глибини самого закруглення (виїмки) показано на рис. 4, де $2 < 2' < 2'' < 2'''$. Крім того, велику роль відіграє використання корпусу турбіни 1 зі збільшеним об'ємом маховика [6], що дає змогу максимально ефективно використовувати турбіну, перетворюючи кінетичну енергію потоку [7].

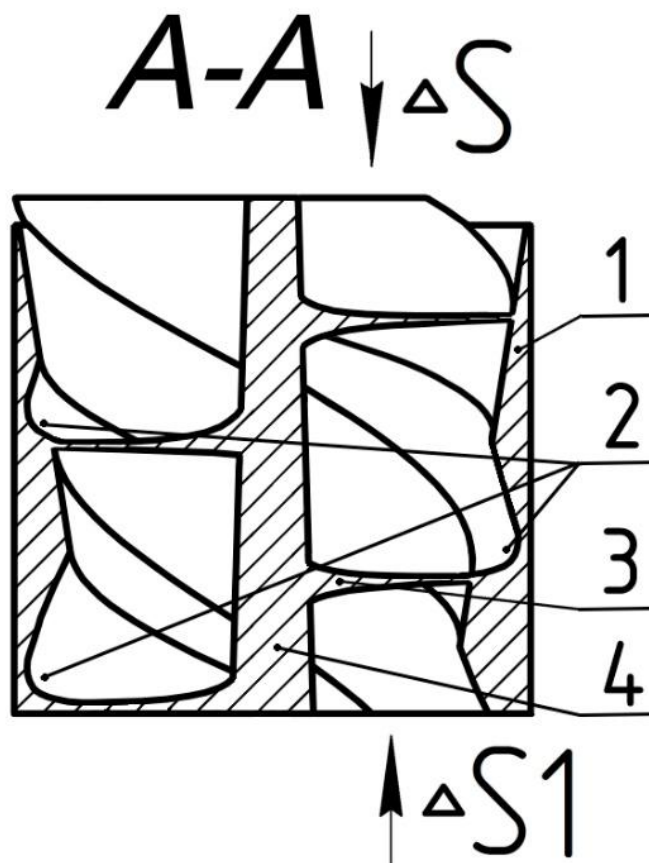


Рис. 1. Схема турбіни гвинтового типу в розрізі А-А

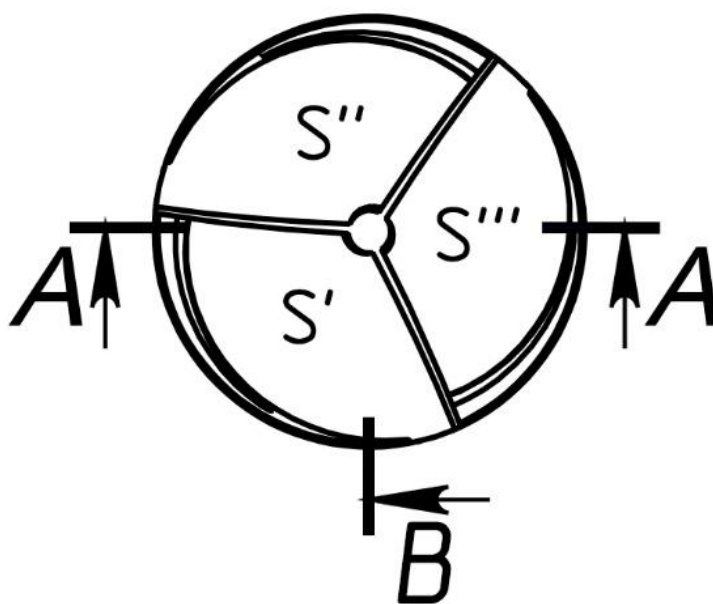


Рис. 2. Схема турбіни гвинтового типу зверху

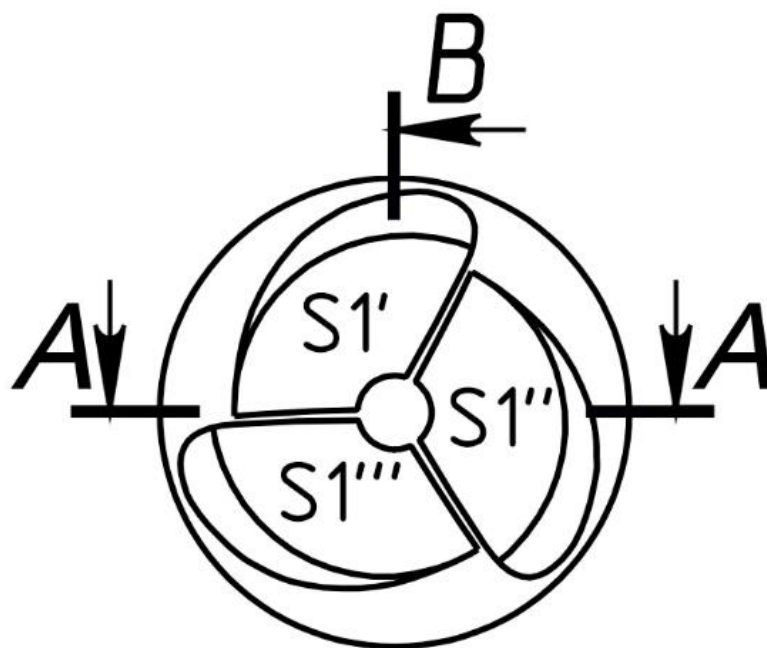


Рис. 3. Схема турбіни гвинтового типу знизу

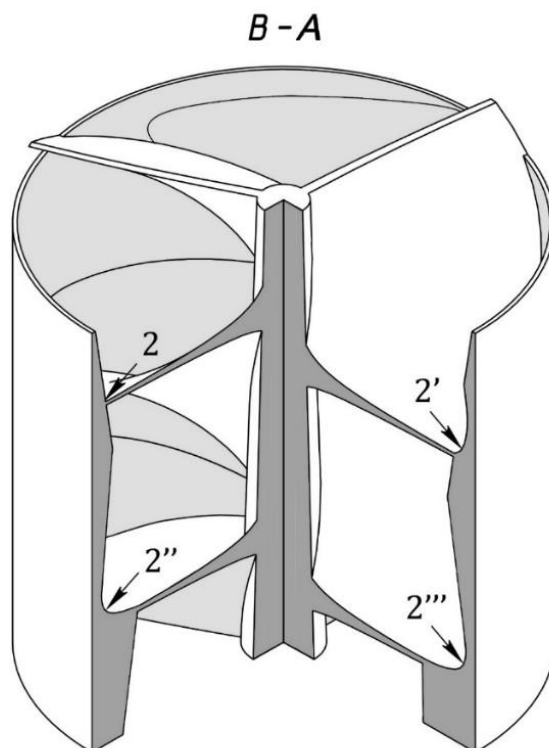


Рис. 4. Схема турбіни гвинтового типу з розрізом В-А в ізометрії

Планування експериментів у водному потоці під кутом 90° до лопатей турбін. Для оцінювання ефективності запроєктованої гвинтової турбіни необхідно провести експериментальні дослідження у водному потоці, порівнявши її роботу з аналогічними моделями за ідентичних розмірів та умов. Важливим етапом цього процесу є планування експериментів, яке включає формулювання мети дослідження, вибір оптимальних параметрів, а також проєктування та налаштування лабораторного стенда для проведення випробувань у спрямованому водному потоці [8].

Для оцінювання продуктивності турбін проведено експериментальні дослідження у водному потоці п'яти моделей: однієї гвинтової типу [7], трьох спіралеподібних [3, 9] та однієї традиційної шнекової [10].

У результаті планування експериментів визначені основні параметри, які необхідно контролювати під час досліджень:

n_1 – кількість обертів турбіни в режимі холостого ходу, об/хв;

n_2 – кількість обертів турбіни з навантаженням ($1 \cdot 21 \text{ Вт}$), об/хв;

n_3 – кількість обертів турбіни з навантаженням ($2 \cdot 21 \text{ Вт}$), об/хв;

n_4 – кількість обертів турбіни з навантаженням ($3 \cdot 21 \text{ Вт}$), об/хв;

U_1 – вироблена генератором електрична напруга без навантаження, В;

U_2 – вироблена генератором напруга з навантаженням ($1 \cdot 21 \text{ Вт}$), В;

U_3 – вироблена генератором напруга з навантаженням ($2 \cdot 21 \text{ Вт}$), В;

U_4 – вироблена генератором напруга з навантаженням ($3 \cdot 21 \text{ Вт}$), В;

h – рівень води у верхньому б'єфі, см;

h_0 – рівень води у верхньому б'єфі, за якого відбувається страгування моделі турбіни, см;

P_1 – електричне навантаження в режимі холостого ходу, потужність 0 Вт;

P_2 – електричне навантаження потужністю 21 Вт;

P_3 – електричне навантаження потужністю 42 Вт;

P_4 – електричне навантаження потужністю 63 Вт.

Експериментальний стенд для досліджень у водному потоці оснащений приладами для вимірювання швидкості обертання досліджуваної моделі турбіни та генерованої електричної напруги. Для зняття показників електричної напруги за режимів холостого ходу (P_1) і з навантаженням (P_2, P_3, P_4) до генератора підключено блок керування навантаженням, де роль навантаження виконують три лампи розжарювання номіналом 12 В і потужністю 21 Вт кожна.

Для дослідження одночасного впливу кількох параметрів (висота води у верхньому б'єфі, ступінь навантаження, геометрія лопатей турбін) застосовано методи факторного планування [11]. Цей підхід дає змогу аналізувати кілька змінних одночасно та оцінювати їхній вплив на продуктивність турбін. Для забезпечення надійності результатів експерименти проводили кілька разів за різних умов, що дає змогу врахувати можливі варіації та отримати точніші дані.

Для порівняння ефективності запропонованих конструкцій турбін з сучасними класичними прототипами виготовлено шнекову турбіну таких самих розмірів, як і в інших моделей ($\varnothing 200 \text{ мм}$, 210 мм). Їхня вага була приведена до маси найважчої – 1100 г шляхом намотування дроту на корпус із балансуванням, при цьому відхилення за вагою становило допустимі $\pm 5 \%$. Це дало змогу провести контрольні експерименти зі шнековою турбіною, що забезпечило можливість порівняння отриманих результатів з іншими конструкціями та об'єктивного оцінювання їхньої ефективності.

Проведення досліджень у водному потоці заплановано у два етапи:

- експериментальні дослідження моделей турбін у водному потоці під кутом 90° до лопатей;

- аналіз і порівняння результатів із визначенням оптимальної конструкції моделі турбіни.

Для визначення найкращого варіанта моделі турбіни на основі аналізу впливу рівня води у верхньому б'єфі на конструкції досліджуваних турбін у режимах холостого ходу (P_1) і з навантаженням (P_2, P_3, P_4) кожній із турбін надано по шість значень рівня верхнього б'єфа (h). Отже, для оцінювання ефективності різних варіантів серед досліджуваних турбін необхідно провести $5 \cdot 24 = 120$ експериментів, під час яких буде отримано 240 показників.

Проведені експерименти шифрували так: римська цифра на початку шифру позначає модель досліджуваної турбіни. Шифри відповідають таким назвам турбін:

I – турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі;

II – турбіна з прямими спіралеподібними лопатями, що збільшуються в об'ємі;

III – турбіна з прямими спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу;

IV – турбіна гвинтового типу;

V – шнекова турбіна.

Під час проведення експериментів усі отримані дані, зокрема швидкість обертання, вироблена напруга в різних режимах, рівень води у верхньому б'єфі тощо, записали до спеціально розробленої таблиці, яка служить основою для подальшого аналізу та формулювання висновків.

Дослідження моделей турбін у водному потоці та аналіз отриманих результатів. Для дослідження моделей у водному потоці за умови впливу двох змінних на характеристики модифікованих шнекових турбін використано факторний експеримент. Це дасть змогу дослідити вплив кожного з факторів (висота води у верхньому б'єфі та навантаження), а також їхню взаємодію. У результаті потрібно

провести експерименти для кожної комбінації рівнів факторів, щоб визначити залежність.

У таблиці зафіксовано отримані показники, вироблені досліджуваними моделями турбін (I, II, III, IV, V), обертів (n), вихідної напруги (U) із генератора в чотирьох режимах (P_1, P_2, P_3, P_4) і за п'яти рівнів води у верхньому б'єфі (h), також зафіксовано відповідний момент страгування (h_0) у водному потоці під кутом 90° до лопатей.

Після проведення експериментів із досліджуваними моделями турбін на кожному рівні висоти води у верхньому б'єфі (h) і зі зміною навантаження (P) проаналізовано вплив цих факторів на основний вихідний параметр – електричну напругу (U). Для оцінювання ефективності турбін побудовано графік (рис. 5), що відображує залежність виробленої генератором електричної напруги (U) від висоти води у верхньому б'єфі (h) для всіх досліджуваних моделей (I, II, III, IV, V) за двох рівнів навантаження (P_1, P_4).

Аналіз отриманих експериментальних результатів свідчить, що висота води у верхньому б'єфі (h) є визначальним фактором, який впливає на потенційну енергію потоку. Зі збільшенням рівня води підвищується швидкість потоку, що у свою чергу призводить до зростання частоти обертання турбін і відповідно збільшення виробленої електричної напруги.

Серед досліджених моделей найвищі показники в усіх чотирьох режимах навантаження за різних рівнів води у верхньому б'єфі продемонструвала турбіна гвинтового типу (IV):

– напруга в режимі холостого ходу (IVP_1) відповідно до рівня води відповідала: $h_{20} = 10,8$ В; $h_{30} = 14,6$ В; $h_{40} = 18,5$ В; $h_{50} = 21,8$ В; $h_{60} = 24,7$ В;

– напруга в режимі максимального навантаження (IVP_4): $h_{20} = 6,1$ В; $h_{30} = 10,0$ В; $h_{40} = 14,3$ В; $h_{50} = 17,5$ В; $h_{60} = 20,3$ В.

Таблиця

Отримані показники експериментів досліджуваних моделей турбін у водному потоці за режимами навантаження (P_1 , P_2 , P_3 , P_4)

Навантаження	Турбіна	h_0	h	20	30	40	50	60
P_1	I	11,3	B	9	13	16,7	20	23,7
			об/хв	212	311	403	491	602
	II	9	B	9,4	14,1	17,3	20,5	23,9
			об/хв	223	333	417	504	607
	III	8,8	B	10,2	14,6	18,5	21,8	24,7
			об/хв	247	343	447	545	630
	IV	7,2	B	10,8	15,3	19,5	23	26
			об/хв	259	362	475	582	664
	V	12,5	B	8,7	12,7	16	18,4	20,7
			об/хв	201	301	384	444	511
P_2	I	13,5	B	6,8	10,2	14	17,5	20,9
			об/хв	163	247	330	420	517
	II	12	B	7,5	11,7	14,5	17,8	21,3
			об/хв	178	280	342	428	532
	III	11,9	B	7,9	12	15,2	18,8	21,2
			об/хв	185	285	362	454	527
	IV	10,3	B	9,2	13,5	17,6	21	24
			об/хв	218	321	423	520	611
	V	14,2	B	6,5	10,3	13,7	16,2	18,1
			об/хв	158	248	323	388	436
P_3	I	14,7	B	5,2	8	12	15,5	18,1
			об/хв	129	187	285	368	437
	II	13,4	B	5,8	9,1	12,6	15,7	18,6
			об/хв	143	214	300	375	450
	III	13,4	B	6,3	9,5	13,1	16,4	18,6
			об/хв	154	227	314	392	450
	IV	11,9	B	7,5	11,6	15,9	19	21,9
			об/хв	178	278	381	461	548
	V	15,8	B	5	8,4	11,7	14,2	16,1
			об/хв	125	195	280	336	386
P_4	I	15,8	B	3,9	6,7	10,3	13,5	16,2
			об/хв	105	160	248	321	388
	II	15	B	4,5	7,4	10,8	13,6	16,5
			об/хв	113	177	259	322	396
	III	14,9	B	4,7	7,6	11,3	14	16,9
			об/хв	116	180	268	330	407
	IV	13,3	B	6,1	10	14,3	17,5	20,3
			об/хв	129	243	337	420	500
	V	17,3	B	3,7	6,7	10,1	12,7	14,5
			об/хв	102	160	245	301	342

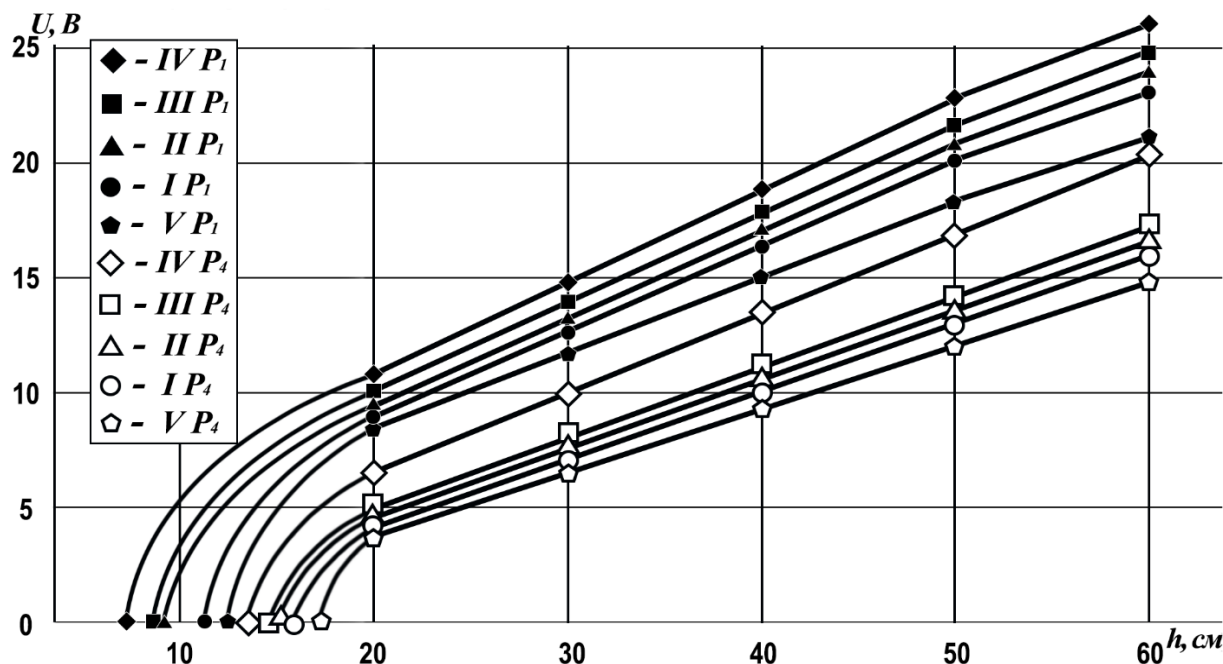


Рис. 5. Графік залежності виробленої генератором електричної напруги (U) від висоти води у верхньому б'єфі (h) для всіх досліджуваних моделей (I, II, III, IV, V) за двох рівнів навантаження (P_1 , P_4).

Натомість найнижчі результати зафіксовано у традиційній шнекової турбіні (V):

– напруга в режимі холостого ходу (VP_1): $h_{20} = 8,7$ В; $h_{30} = 12,7$ В; $h_{40} = 16,0$ В; $h_{50} = 18,4$ В; $h_{60} = 20,7$ В;

– напруга в режимі максимального навантаження (VP_4): $h_{20} = 3,7$ В; $h_{30} = 6,7$ В; $h_{40} = 10,1$ В; $h_{50} = 12,7$ В; $h_{60} = 14,5$ В.

Навантаження на турбіні суттєво впливає на їхню частоту обертання: зі збільшенням навантаження турбіни уповільнюються, що призводить до пропорційного зниження напруги. Однак за однакової маси та геометричних розмірів гвинтовій турбіні вдалося досягти кращих показників порівняно зі шнековою завдяки конструктивним особливостям. Зокрема, напруга в режимі P_1 за h_{60} у гвинтової турбіни була на 4,0 В (19 %) вище, ніж у шнекової, а в режимі максимального навантаження (P_4) різниця становила 6,2 В (40 %). Це свідчить про значну перевагу гвинтової конструкції в умовах змінного навантаження.

Загалом результати експериментів підтвердили, що розроблена турбіна гвинтового типу має вищу ефективність в усіх режимах навантаження та рівнях води, що пояснюється оптимізованою конструкцією. Додаткову перевагу забезпечило використання корпусу турбіни як маховика, що сприяло покращенню роботи в умовах максимального навантаження.

Висновки. Гвинтові турбіни мають великий потенціал для використання в будівництві гідроенергетичних установок завдяки їхній компактності, ефективності та надійності. Вони повністю прийнятні для умов із малими перепадами, зокрема на малих гідроелектростанціях.

Запропонована конструкція турбіни гвинтового типу з виїмками та збільшеним в об'ємі корпусом дає змогу більш ефективно використовувати кінетичну енергію потоку. При цьому така конструкція зменшує кінцеві гідравлічні втрати на тертя і від

завихрень із кінців лопатей, збільшуючи ККД турбіни.

Подальші дослідження доповнюють повноту картини з визначення продуктивності поданих турбін і підтверджують теоретичні розрахунки ефективності турбіни гвинтового типу.

Майбутні дослідження в цій сфері можуть включати інтеграцію турбін

гвинтового типу в системи вироблення енергії, розвиток технологій відновлюваної енергетики, а також адаптацію цих турбін для використання в різних кліматичних умовах.

Гвинтові турбіни є надійним рішенням для багатьох галузей, включаючи гідроенергетику, будівництво вентиляційних систем.

Список використаних джерел

1. Brada K., Radlik K.A. Water Screw Motor to Micro Power Plant - First Experiences of Construction and Operation. 1998.
2. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України. Технологічні особливості малих ГЕС. Київ, 2018. Т. II. 144 с.
3. Турбіна зі спіралеподібними лопатями: пат. № 150304 / О. В. Герба; u202104720; заявл. 17.08.2021; опубл. 26.01.2022; Бюл. № 4. 17 с.
4. Hailu G., Varchola M., Hlbocan P. Design of Hydrodynamic Machines: Pumps and Hydro-Turbines ISBN-978-0367439613, CRC Press; 1st edition 2022. 268 p.
5. Schauburger V. The Energy Evolution: Harnessing Free Energy from Nature. Gateway 2000. 272 p.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. Изд. 2-е, испр. Москва: Наука, 1965. Т. 1. 204 с.
7. Турбіна гвинтового типу: пат. № 156567 / О. В. Герба, О. О. Ключа; u202400504; заявл. 30.01.2024; опубл. 10.07.2024; Бюл. № 28.
8. Рябенко О. А. Хвилястий стрибок: монографія. Рівне: НУВГП, 2022. 277 с.
9. Герба О. В. Використання турбін зі спіралеподібними лопатями. *Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць*. Рівне : НУВГП, 2023. Вип. 4(104). С. 3-12.
10. Шнекова турбіна. URL: <https://promenergia.com.ua/hidroturbiny/shnekova-turbina/>.
11. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. Москва: Наука. 1976. 296 с.

Герба Олександр Володимирович, аспірант кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин, Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна.
ORCID. ID: <https://orcid.org/0009-0009-7592-800X>. E-mail: o.v.herba@nuwm.edu.ua.

Herba Oleksandr Volodymyrovych, postgraduate student at the department of hydropower engineering, thermal power engineering and hydraulic machines. National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine).
ORCID. ID: <https://orcid.org/0009-0009-7592-800X>. E-mail: o.v.herba@nuwm.edu.ua.

Статтю прийнято 18.02.2025 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 697.343

OPERATION OF HEAT NETWORKS UNDER CONDITIONS OF «REDUCED» HEATING TEMPERATURE SCHEDULE

PhD (Tech.) O. Gvozdeckiy, PhD (Tech). O. Milanko, PhD (Tech.) R. Tkachenko,
PhD (Tech.) A. Yuzbashyan, Sr. lecturer S. Romanenko

РОБОТА ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ «ЗНИЖЕНОГО» ОПАЛЮВАЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАФІКА

Кандидати техн. наук О. В. Гвоздецький, О. М. Міланко, Р. Б. Ткаченко,
А. П. Юзбашьян, старш. викл. С. В. Романенко

Abstract. The article examines the operation of distribution heat networks at different temperatures of the coolant in the heat supply system according to the heating temperature schedule of quality regulation. Comparisons are made of heat and hydraulic losses when changing the temperatures of the heating temperature schedule, with the existing constant diameter of the heating network. The consequences of using this schedule in existing heating systems of the twentieth century are also considered.

Keywords: Temperature chart, coolant flow, heat losses, hydraulic losses, thermal energy, consumer, heat networks.

Анотація. У статті розглянуто роботу розподільних теплових мереж з різними температурами теплоносіями в системі теплопостачання за опалювальним температурним графіком якісного регулювання. Порівняно теплові та гідравлічні втрати зі зміною температур опалювального температурного графіка з постійним наявним діаметром теплової мережі. Збільшення температури теплоносія призводить до зменшення його витрат, а отже, зменшення гідравлічних втрат у сучасних теплових мережах. Крім того, ремонтуючи або реконструюючи теплову мережу, можна зменшувати її діаметри. Однак збільшення температур теплоносія в деяких випадках може призвести до додаткових витрат, пов'язаних із необхідністю влаштування індивідуальних теплових пунктів із вузлами змішування або встановлення теплообмінних апаратів за незалежної схеми підключення систем опалення до теплових мереж, для необхідного зниження температурного потенціалу.

Також використання «зниженого» температурного графіка в сучасних системах опалення забудови ХХ століття призводить до зменшення тепловіддачі наявних нагрівальних приладів, які були запроєктовані та встановлені в умовах роботи за температурними графіками, застосовуваними раніше. Наведено заходи, необхідні для використання «зниженого» температурного графіка в сучасних системах опалення. До них можна віднести реконструкцію системи опалення, пов'язану зі збільшенням площі нагріву нагрівальних приладів; модернізацію будівлі, пов'язану з підвищенням її енергоефективності, шляхом влаштування теплової ізоляції огорожувальних конструкцій, встановлення сучасних склопакетів тощо, що знизить необхідне теплове навантаження системи опалення.

Ключові слова: температурний графік, витрати теплоносія, теплові втрати, гідравлічні втрати, теплова енергія, споживач, теплові мережі.

Introduction. Currently, many heat supply organizations have switched to the operation of heat supply sources with a «reduced» temperature schedule of quality regulation. This also applies to the city of Kharkiv. For example, the heat supply source that provides thermal energy to a significant part of the city, TPP-5, previously worked according to a temperature schedule of 150-70 °C, and from the beginning of the 21st century to the present, it has been working according to a «reduced» temperature schedule of 124-61 °C. Other heat supply sources have also reduced the coolant temperatures, TPP-3 and many large regional boiler houses, which previously worked according to a temperature schedule of 135-70 °C, now work according to a temperature schedule of 118-59 °C.

In the city of Kharkiv, regulation of heat energy supply is qualitative – changing the temperature of the coolant depending on the outside air temperature, while the coolant flow rate is a constant value (true for the heating temperature schedule). Existing types of regulation of heat energy supply and requirements for heating network pipelines are described in [1]. Issues related to the rational use of one or another type of regulation of heat energy supply are considered in articles [11, 12].

Analysis of recent research and publications. The centralized heat supply system consists of a heat supply source, heat networks and a consumer. Heat losses in heat network pipelines depend on the temperature of the coolant, the type of thermal insulation, the type of installation, the outside air temperature, the presence of solar radiation, etc. The requirements for heat network pipelines and the type of installation are determined by [1]. Hydraulic losses depend on the coolant flow rate, the pipeline diameter, the material of the heat network pipes, and the service life (especially for steel pipes, taking into account their overgrowth and, accordingly, an increase in the wall roughness coefficient).

The main part of the development of the city of Kharkiv dates back to the second half of the 20th century. The heating systems in these buildings are mainly single-pipe (with upper or lower wiring, as well as U-shaped). These heating systems are unregulated. The efficiency of reconstruction of these heating systems comes down to the transition from single-pipe unregulated heating systems to two-pipe systems, with the possibility of regulation by installing thermostatic elements (i.e. the possibility of instrumental regulation). In this case, the consumer can independently choose the temperature inside the premises, which is comfortable for him. This is especially economically feasible with horizontal (apartment) wiring of the heating system and the installation of a distribution unit for metering the thermal energy of the heating system in a given apartment. The possibility and efficiency of such reconstruction are discussed in articles [13-17].

Calculations of heat losses in heating networks, as well as their methods, are considered in works [18-21, 23], and the calculation of hydraulic losses in [22-24].

The existing works do not reflect how, from an economic point of view, it is more efficient to transfer thermal energy to the consumer with an increased temperature or with an increased flow rate of the coolant. In addition, there is no analysis of the effect of a decrease in the temperature of the coolant, and, consequently, the temperature pressure, in existing heating systems of the 20th century buildings.

Goal and task setting. The main objective of this work is to determine the economic feasibility of using a «reduced» temperature schedule. The amount of thermal energy is determined as the product of the coolant flow rate and the temperature difference between the supply and return pipelines of the heating networks, and, therefore, when the temperature difference decreases, we increase

the coolant flow rate, which leads to an increase in hydraulic losses.

The second aspect of this work is to determine how much the amount of heat supplied to the consumer will decrease for existing heating systems of the 20th century buildings, with a decrease in temperature pressure. With previously existing temperature schedules of 150-70 °C and 135-70 °C, the maximum calculated temperature of the coolant supplied to the heating systems after the mixing unit was 95-70 °C, and in some cases, with a single-pipe heating system in sixteen-story residential buildings, a temperature schedule for heating systems of 105-70 °C was used.

Today, according to [2], the maximum permissible temperature of the coolant supplied to the heating system of residential and administrative buildings for two-pipe heating systems is 95 °C, and for one-pipe heating systems of these buildings it can reach up to 105 °C.

The main part of the study. For the study, we considered a dead-end distribution (intra-block) section of the heating network with a heat load of the heating system of the connected consumer of 0.37 Gcal/h or 0.43 MW. The heat supply system is closed, four-pipe; coolant is water; regulation is high-quality, according to the heating temperature schedule; hot water supply is provided by separate pipelines from the central heating station (CHS), where the heat exchanger of the hot water supply system is installed. The heat source operates according to the temperature schedule of 118-59 °C. The mixing unit is provided at the individual heating station (IHS), which reduces the coolant temperature from 118 °C to 78 °C. Before the beginning of the 21st century, the heat supply source operated according to the temperature schedule of 135-70 °C, and after the IHS, the temperature schedule was 95-70 °C. The section of the heating network in question is laid above ground, the existing pipelines of the heating network are made in accordance with the requirements of [1], these are pre-insulated factory-made pipes in polyurethane foam

thermal insulation with a protective shell made of galvanized metal sheet («Spiro» pipes). The diameters of the pipelines of the existing section of the heating network are 76/140*3.5 [8];

where 76 – outer diameter of steel pipe according to [7], mm;

140 – total diameter of pipe, taking into account thickness of thermal insulation, mm;

3.5 – wall thickness of steel pipe, mm.

The length of the existing section of the heating network is 82 m.

In a residential building, cast iron radiators of the M-140 brand are installed in the heating system, which have a maximum heat output of 160 W, with a temperature pressure of 70 °C.

In the first part of the study, we will consider two options for the operation mode of heating networks, with different temperature characteristics: with a temperature schedule of 118-59 °C and with a temperature schedule of 135-70 °C. We will determine the hydraulic and thermal losses of the section under consideration.

Option 1. We determine the hydraulic and thermal losses of a section of the heating main with a temperature schedule of 118-59 °C.

To determine the hydraulic losses, it is necessary to determine the flow rate of the coolant. The flow rate of the coolant, t/hour, for the needs of the heating system is determined according to [1]

$$G_{o.max} = \frac{3,6 \cdot Q_{o.max}}{c \cdot (\tau_1 - \tau_2)} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

where $Q_{(o.max)}$ – maximum heat load of the heating system, W;

c – specific heat capacity of water, 4.187 kJ/(kg·°C) is assumed in calculations;

τ_1 – coolant temperature in the supply pipeline, °C;

τ_2 – coolant temperature in the return pipeline, °C.

Having determined the coolant flow rate and knowing the pipeline diameter, using tables

[24] we determine the specific pressure losses, Pa/m. The hydraulic calculation table is made for a coolant density of 958 kg/m^3 and $k_e = 0.5$. For the actual coolant temperature, it is necessary to recalculate using the formula

$$R_f = R_v \rho_v / (\rho_f), \quad (2)$$

where ρ_f – coolant density, which depends on its temperature, kg/m^3 .

Formula (2) is valid for new pipes with $k_e = 0.5$.

We find the speed of the coolant, m/s, using the formula

$$W = \frac{4 \cdot G_{o.max} \cdot 10^6}{3,14 \cdot d^2 \cdot 3,6 \cdot \rho_f}, \quad (3)$$

where d – internal diameter of the pipeline, mm.

We determine the value of the reduced length of the heating main, m, using the formula

$$l_{pr} = l \cdot (1 + \alpha), \quad (4)$$

where l – length of the heating main section, according to the plan, m;

α – the coefficient that takes into account pressure losses in local resistances is determined from tables [24].

Pressure losses in a network section, Pa, are determined by the formula

$$\Delta P = R \cdot l_{pr}, \quad (5)$$

where R – specific pressure losses, which are determined based on the known diameter and the found flow rate, according to hydraulic calculation tables [24], Pa/m.

Based on the pressure losses found, we determine the head loss, m. water column, using the formula

$$\Delta H = \Delta P / (\rho_f \cdot g), \quad (6)$$

where g – acceleration of gravity, which we take to be 9.807 m/s^2 .

Using formula (1), with a temperature graph of $118-59^\circ\text{C}$, we find the value of the coolant flow rate, which is 6.3 t/h ; 1.74 kg/s or $6.7 \text{ m}^3/\text{h}$.

The data for constructing the heating temperature graph, with coolant parameters of $118-59^\circ\text{C}$, were obtained at an air temperature inside residential premises of $+20^\circ\text{C}$ [2] and are presented in Table 1.

Table 1

Data for constructing a heating temperature graph at a calculated coolant temperature of $118-59^\circ\text{C}$

$t, ^\circ\text{C}$	-23	-20	-15	-10	-5	-1	0	+5	+8
$\tau_1, ^\circ\text{C}$	118	114,0	111,9	101,7	91,3	72,1	69,9	58,8	52,0
$\tau_2, ^\circ\text{C}$	59	57,7	57,0	53,7	50,1	43,3	42,5	38,3	35,5
$\tau_{11}, ^\circ\text{C}$	118	114,0	111,9	101,7	91,3	52,6	51,3	44,9	40,8

where t – outside temperature, $^\circ\text{C}$;

τ_{11} – coolant temperature in the supply pipeline, which is supplied to the heating system, $^\circ\text{C}$.

The data on the calculated heating temperature of the outside air are taken according to parameters B, for the city of Kharkiv. The calculated heating temperature

and the average outside air temperature for the heating period are taken according to the data of [3]. The heating temperature graph, coolant flow rate graph, «operating point» and

hydraulic characteristic curves of the section under consideration and the consumed power of the electric motor are presented in Fig. 1-4.

The average temperature of the coolant in the supply pipeline during the heating period is 72.1 °C, and in the return pipeline 43.3 °C.

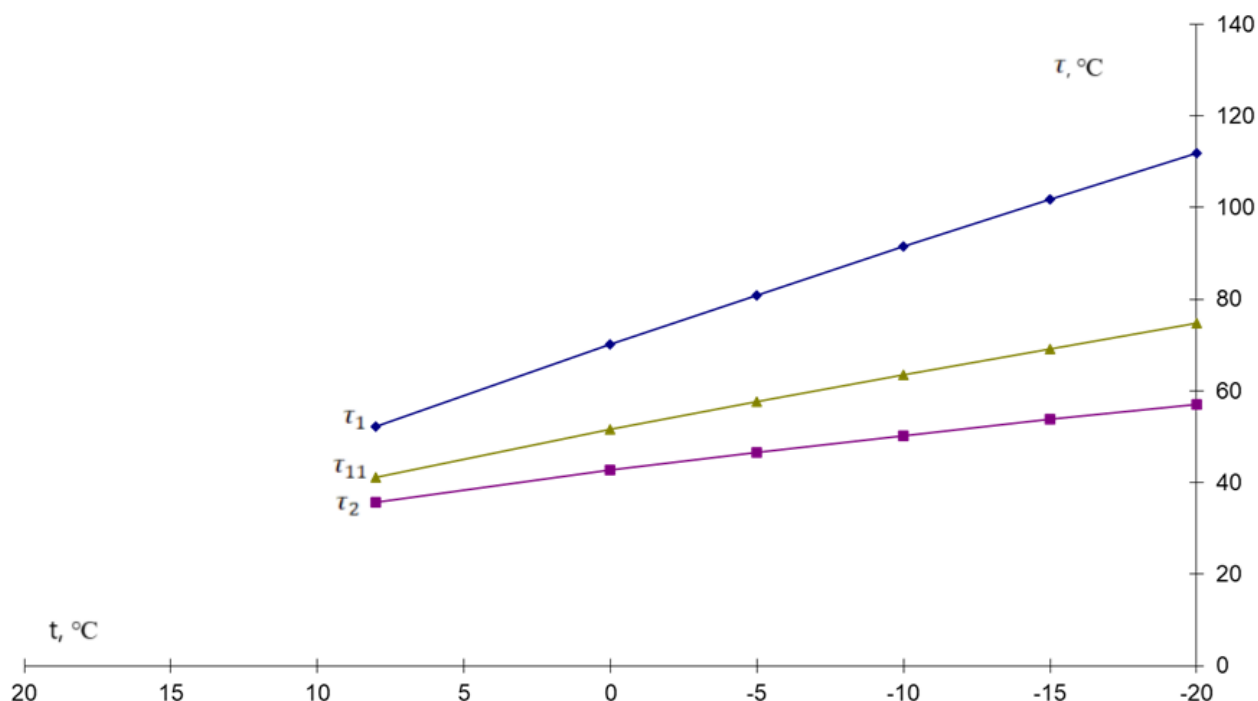


Fig. 1. Heating temperature graph at calculated coolant temperatures of 118-59 °C

Using the data from the tables for hydraulic calculation [24] and formulas (2-6), perform a hydraulic calculation of the section of the heating network under consideration. The calculation is summarized in Table 2.

As can be seen from Fig. 4, to overcome the hydraulic resistance of the considered section of the network, the pump electric motor power of 0.058 kW is required. Fig. 3-4 show the characteristics of the energy-efficient pump with a frequency converter Magna3 32-40 [25].

Table 2

Hydraulic calculation of the considered section of the heating network at the calculated coolant temperature of 118-59 °C

G, kg/s	l, m	a	L _{pr} , m	d, mm	w, m/s	R, Pa/m	R _f , Pa/m	ΔP, Pa	H, m.water column	ΣH, m.water column
1.74	82	0.3	106.6	76	0.47	51.8	52.5	5596.5	0.6	1.2

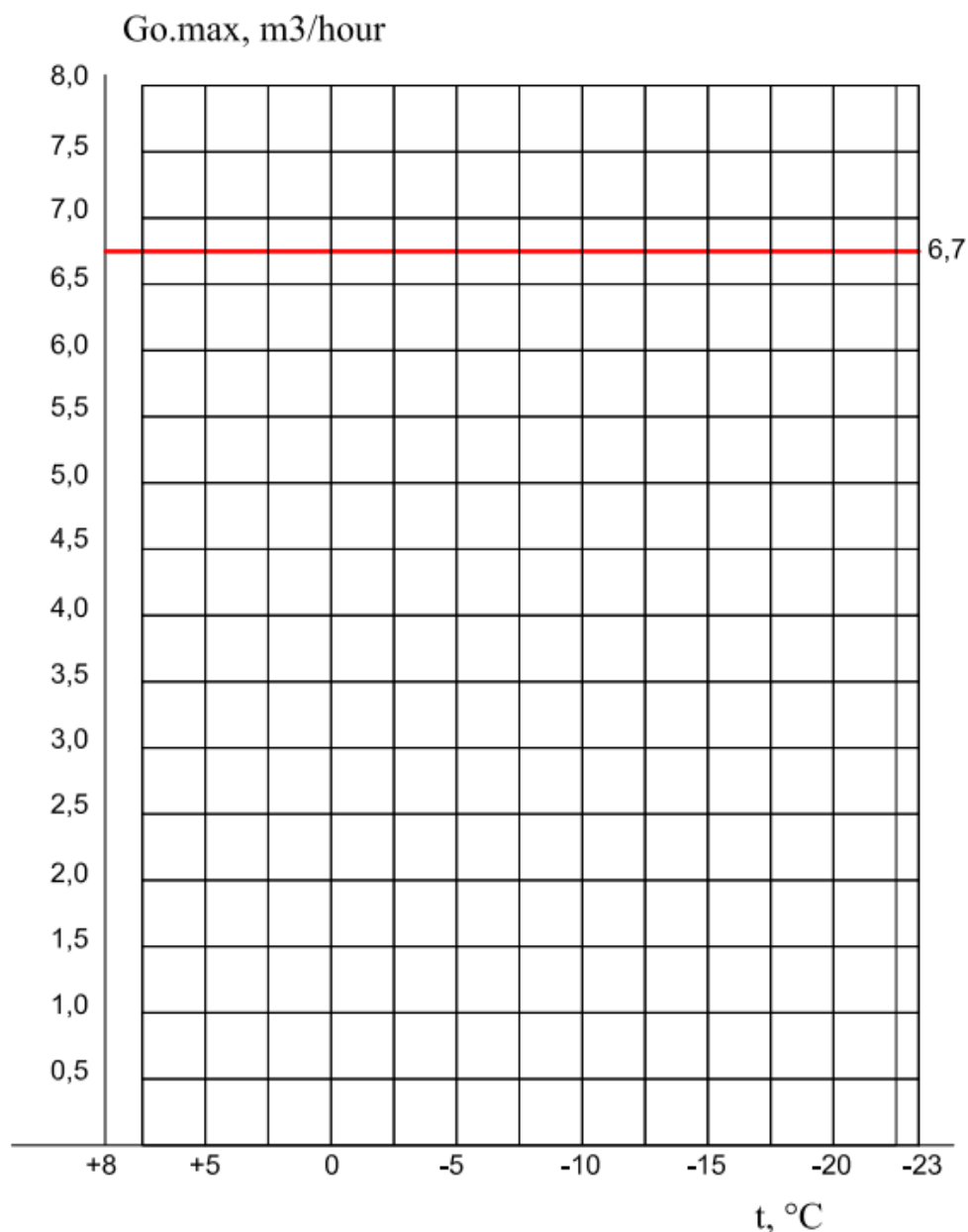


Fig. 2. Heat carrier flow rate graph, at calculated heat carrier temperatures of 118-59 °C, high-quality regulation

Next, we determine the heat losses of the heating network pipelines, which have a diameter of 76/140*3.5. The laying is above ground, the pipes are steel, pre-insulated, factory-made. The average temperatures of the coolant during the heating period are: supply pipeline 72.1 °C, return pipeline 43.3 °C.

The calculation is performed according to the method given in [4].

We find the ratio of the total diameter of the pipe, taking into account thermal insulation, to the outer diameter of the pipe.

$$B = \frac{d_i}{d}, \quad (7)$$

where d_i – total pipe diameter, taking into account thermal insulation, m;
 d – outside diameter of the pipe, m.

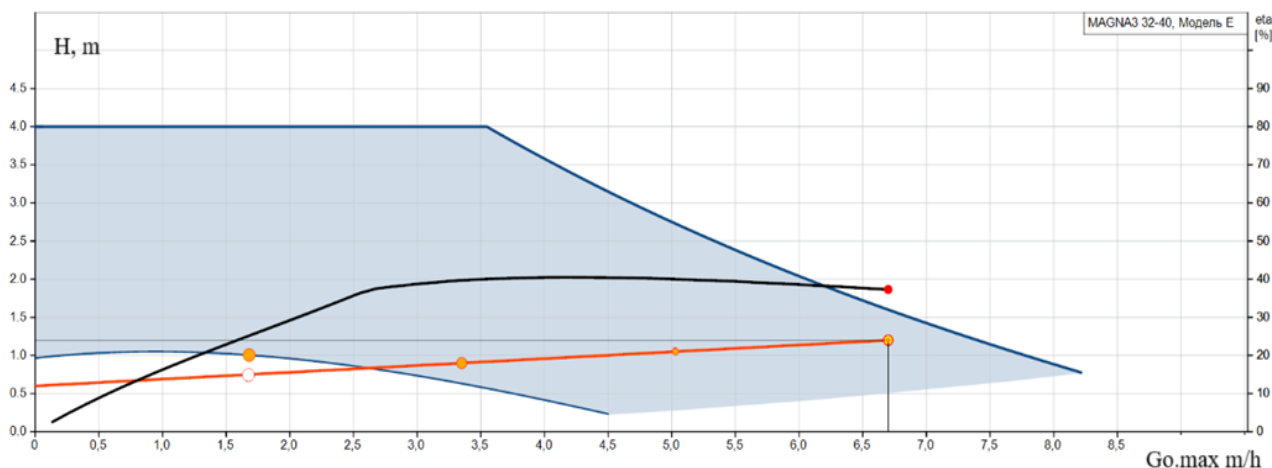


Fig. 3. Operating point and hydraulic performance curves of the pump

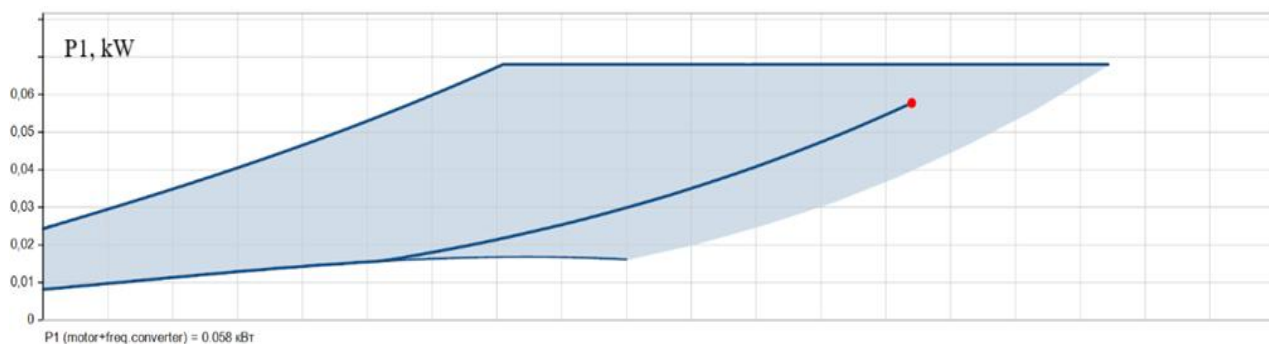


Fig. 4. Power characteristic of the pump electric motor

Defining the natural logarithm B ($\ln B$).

We determine the total thermal resistance of the thermal insulation layer and additional thermal resistances along the heat flow path using the formula

$$r_{tot} = \frac{\ln B}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_k} + \frac{1}{a_e \cdot \pi \cdot (d+1)}, \quad (8)$$

where λ_k – thermal conductivity of the heat-insulating layer, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, we take 0.027 according to the data [26];

a_e – heat transfer coefficient from the outer surface of thermal insulation, taken according to data [4], $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

We determine the specific thermal loss, W/m , using the formula

$$q_e = \frac{\tau - t_c}{r_{tot}}, \quad (9)$$

where τ – average temperature of the coolant during the heating period, $^\circ C$;

t – average outside air temperature during the heating period, taken according to [3], $^\circ C$.

The calculation of heat losses through heating network pipelines is summarized in Table 3.

Table 3

Average thermal losses by pipelines during the heating period, with a calculated coolant temperature of 118-59 °C

τ , °C	t , °C	d , m	d_i , m	B	$\ln B$	L , m	r_{tot}	Thermal losses		
								q_e , W/m	q , W	q_o , kW
72.1	-1	0.076	0.14	1.842	0.611	82	3.65	20.03	1642.2	7055.1
43.3	-1	0.076	0.14	1.842	0.611	82	3.65	12.14	995.2	4275.5
Total										11330.6

where L – length of the considered section, m;

q_o – average thermal losses by pipelines during the heating period, the heating period for the city of Kharkiv is taken as 179 days, according to data [3].

Option 2. We determine the hydraulic and thermal losses of a section of the heating main at a temperature schedule of 135-70 °C.

According to formula (1), at a temperature schedule of 135-70 °C, we find the value of the coolant flow rate, which is 5.7 t/h; 1.58 kg/s or 6.1 m³/h.

The data for constructing the heating temperature schedule, at coolant parameters of 118-59 °C, were obtained at an air temperature inside residential premises of +20 °C [2] and are

presented in Table 4. The data on the calculated heating temperature of the outside air are taken according to parameters B , for the city of Kharkiv. The calculated heating temperature and the average outside air temperature for the heating period are taken according to the data of [3]. The heating temperature schedule, coolant flow schedule, «operating point» and hydraulic characteristic curves of the section under consideration and the consumed power of the electric motor are presented in Fig. 5-8.

Table 4

Data for constructing a heating temperature graph at a calculated coolant temperature of 135-70 °C

t , °C	-23	-20	-15	-10	-5	-1	0	+5	+8
τ_1 , °C	135	130.3	128.0	116.1	104.0	81.7	79.1	66.1	58.1
τ_2 , °C	70	68.3	67.5	63.2	58.7	49.9	48.9	43.4	39.9
τ_{11} , °C	95	92.2	90.7	83.5	76.1	62.1	60.5	52.2	46.9

Using the data from the tables for hydraulic calculation [24] and formulas (2-6), we perform a hydraulic calculation of the

section of the heating network under consideration. The calculation is summarized in Table 5.

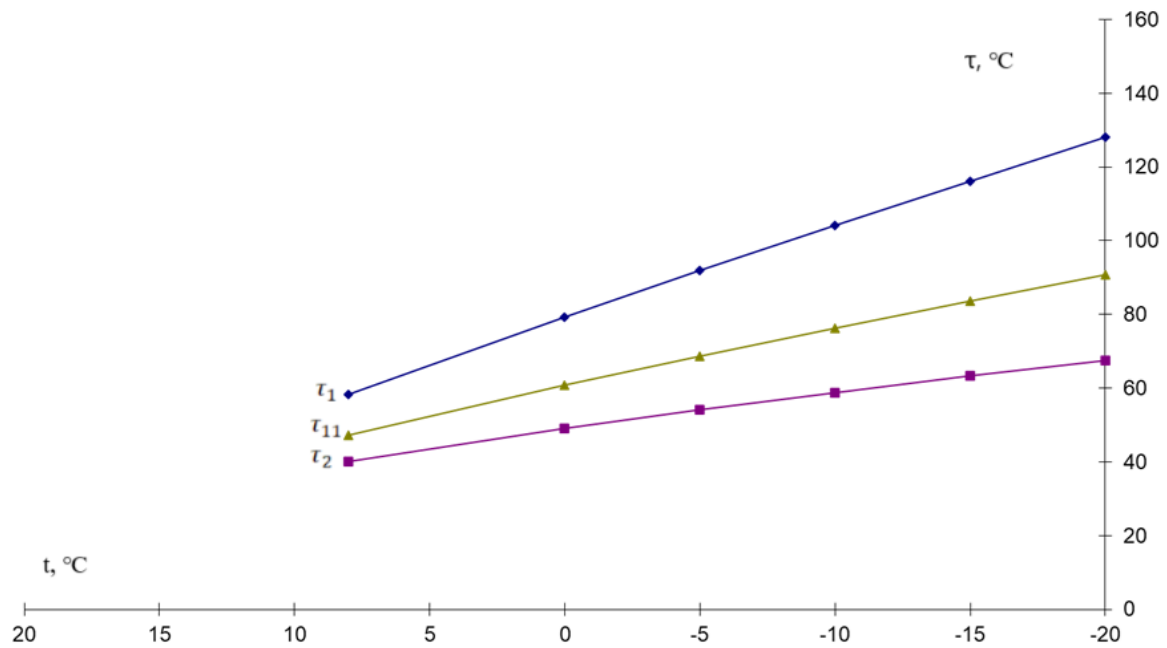


Fig. 5. Heating temperature graph at calculated coolant temperatures of 135-70 °C

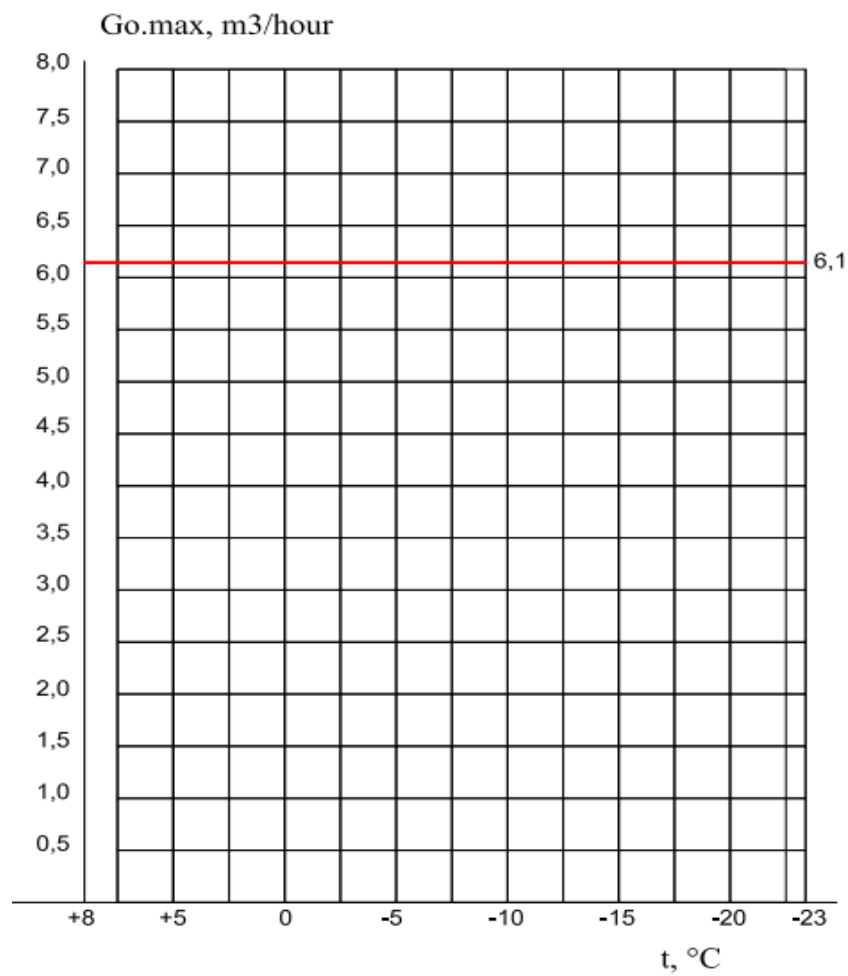


Fig. 6. Heat carrier flow rate graph, at calculated heat carrier temperatures of 135-70 °C, high-quality regulation

Table 5

Hydraulic calculation of the considered section of the heating network at the calculated coolant temperature of 135-70 °C

G, kg/s	l, m	a	L _{pr} , m	d, mm	w, m/s	R, Pa/m	R _f , Pa/m	ΔP, Pa	H, m.water column	ΣH, m.water column
1.58	82	0.3	106.6	76	0.45	51.8	42.7	4551.8	0.5	1.0

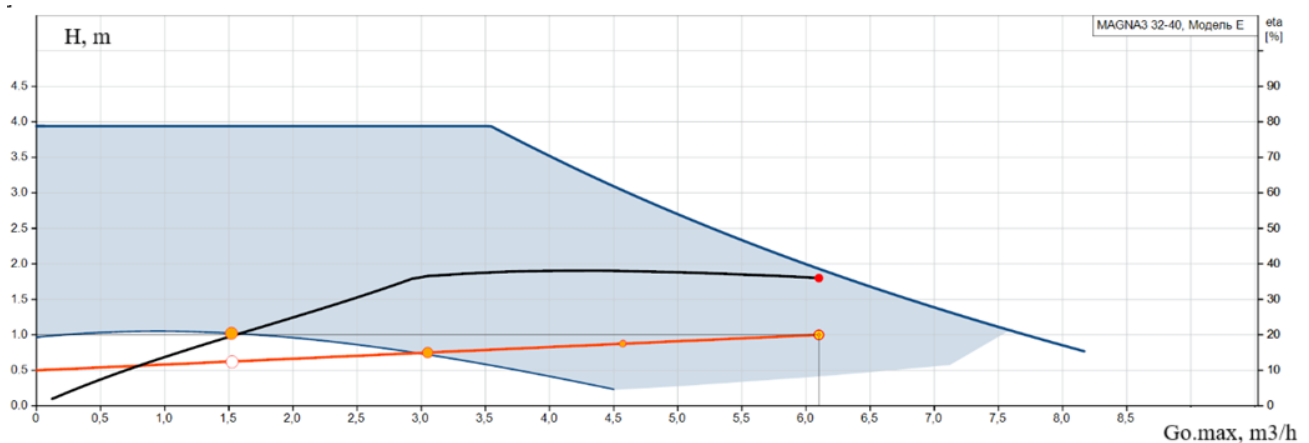


Fig. 7. Operating point and hydraulic performance curves of the pump

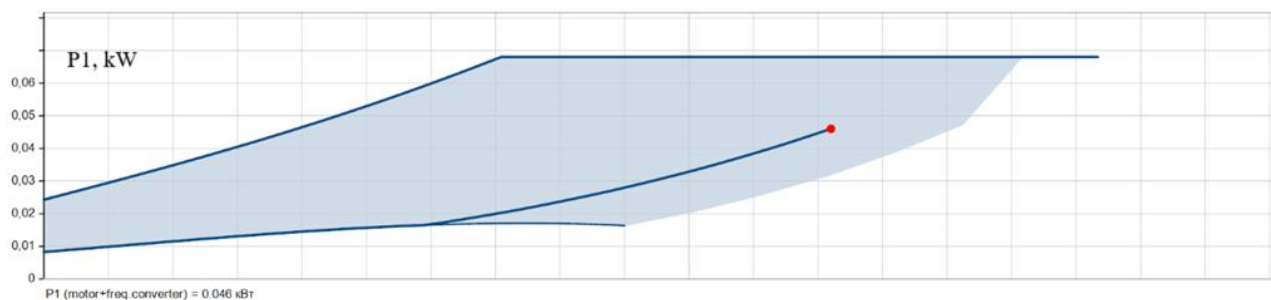


Fig. 8. Power characteristic of the pump electric motor

As can be seen from Fig. 8, to overcome the hydraulic resistance of the considered section of the network, the pump electric motor power of 0.046 kW is required. Figures 7-8 show the characteristics of the energy-efficient pump with a Magna3 32-40 frequency converter [25].

Next, we determine the heat losses of the heating network pipelines, which have a

diameter of 76/140*3.5. The laying is above ground, the pipes are steel, pre-insulated, factory-made. The average temperatures of the coolant during the heating period are: supply pipeline 81.7 °C, return pipeline 49.9 °C.

The calculation of heat losses by the heating network pipelines is summarized in Table 6.

Table 6

Average thermal losses by pipelines during the heating period, with a calculated coolant temperature of 135-70 °C

τ , °C	t , °C	d , m	d_i , m	B	$\ln B$	L , m	r_{tot}	Thermal losses		
								q_e , W/m	q , W	q_o , kW
81.7	-1	0.076	0.14	1.842	0.611	82	3.65	22.66	1858.1	7982.4
49.9	-1	0.076	0.14	1.842	0.611	82	3.65	13.95	1143.9	4914.2
Total										12896.6

Next, we conduct an economic comparison of the obtained results of hydraulic and thermal losses obtained for options 1 and 2. We summarize the calculation in Table 7.

Data on the cost of thermal energy are taken from [27]. Data on the cost of electrical energy are taken from [28].

The results in Table 7 show that the use of a «reduced» temperature schedule is currently an economically feasible solution.

Table 7

Summary comparison table

Temperature graph	Thermal losses during the heating period, Gcal	Power consumption of the pump electric motor, during the heating period, kW	Tariff 1 Gcal, UAH	Tariff for 1 kW/h of electric energy, UAH	Price for thermal loss during the heating period, UAH	Price of electric energy, for the heating period, UAH	Total costs, UAH
118-59	9.74	249.2	1539.5	10.05	14994.73	2504.46	17499.19
135-70	11.1	197.6	1539.5	10.05	17088.45	1985.88	19074.33

In addition, when connecting consumer heating systems to heating networks after a mixing unit or using a heat exchanger of the heating system (with an independent scheme), which can be located at the central heating point, it is necessary to take into account that when the coolant temperature increases above the standards specified in [2], it is necessary to provide for the installation of a separate mixing unit or heat exchanger at the central heating point at each consumer. However, combined regulation consisting of: central; local; individual is more economically advantageous

than combined regulation consisting of: central; group; individual [11].

The second question of our research is to consider the impact of reducing the coolant temperatures in existing heating systems of the 20th century buildings.

In modern construction, the design and installation of heating systems and heating points are carried out in accordance with existing, modern regulatory documents, taking into account energy-efficient technologies, according to the requirements of [1, 2]. In addition, all modern buildings are constructed,

taking into account the requirements for energy efficiency, according to the requirements of [5, 6].

As for five-story, nine-story, twelve-story, fourteen-story, sixteen-story residential buildings of the 20th century, these are mainly panel residential buildings that were built without taking into account energy efficiency requirements.

For example, let's consider a residential building with a heating system heat load of 0.37 Gcal/hour or 430.31 kW. The heating system is two-pipe. Heating devices are cast-iron radiators M-140, 500 mm high. The heat output of one section, at a temperature pressure of 70 °C, is 0.16 kW. Currently, the temperature schedule in the heating system is 78-59 °C. At the time of design and construction, the temperature schedule of the heating system was 95-70 °C. In the calculations, we neglect the heat losses of the heating system pipelines that run through basements, attics, stairwells, etc.

We determine the actual temperature head, °C, using the formula

$$\Delta\tau_f = \frac{\tau_{11} + \tau_2}{2} - t_v, \quad (10)$$

where t_v – indoor air temperature, °C, is taken according to the requirements [2].

We determine the actual heat output of one section, kW,

$$Q_f = Q_p \cdot \left(\frac{\Delta\tau_f}{70}\right)^{1,3}, \quad (11)$$

where Q_p – heat output of one section, at a temperature head of 70 °C, kW.

We determine the required number of radiator sections using the formula

$$n = \frac{Q_o}{Q_f}, \quad (12)$$

where Q_o – maximum heat load of the heating system, W.

We calculate the required number of heating device sections at a temperature schedule of 95-70 °C (the schedule that was used when designing and installing the heating system), and at a temperature schedule of 78-59 °C (which is the current one). We summarize the calculations in Table 8.

Table 8

Summary comparison table

Temperature graph, °C	$\Delta\tau_f$, °C	Q_o , кВт	Q_f , кВт	n , шт.
78-59	48.5	430.31	0.099	4334
95-70	62.5	430.31	0.138	3118
Difference				1216

From the results of the table we see that when using the «reduced» temperature schedule in the heating systems of buildings of the 20th century, which were designed and built for higher temperatures of the coolant, 1216 sections are missing to provide the necessary heat load of the heating system. That is, the actual heat load of the heating system was 308.68 kW instead of the required 430.31 kW, which is 28.27 % of the lost heat energy.

Conclusions. When comparing the operation of heating networks according to the «reduced» temperature schedule with the previously used temperature schedule, in the considered section of the heating network, it can be said that hydraulic losses have not actually changed, and thermal losses have decreased by 1.36 Gcal during the heating period, which is 12.3 %.

However, when using a «reduced» temperature schedule in heating networks, it also leads to a decrease in the temperature of the coolant supplied to the heating system. For modern construction, this is not critical, due to the fact that modern buildings are designed and constructed according to the existing parameters of the heating network, as well as taking into account energy efficiency requirements (installation of modern double-glazed windows, thermal insulation of enclosing structures, etc.). As for the construction of the twentieth century, heating systems were designed for higher temperatures of the coolant and, therefore, the heating area of

the heating devices was selected based on these temperatures. When using a «reduced» temperature schedule in these systems, it leads to a shortfall in thermal energy for consumers. The following measures can be used to solve this issue:

- reconstruction of the heating system, associated with increasing the heating area of heating devices;

- modernization of the building, associated with increasing its energy efficiency, by installing thermal insulation of enclosing structures, installing modern double-glazed windows, etc., which will reduce the required thermal load of the heating system.

References

1. ДБН В.2.5-39:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. Чинний від 2018-01-07. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 56 с.
2. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Чинний від 2014-01-01. Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Чинний від 2011-01-11. Київ: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2010. 127 с.
4. СНіП 2.04.14 – 88. Теплова ізоляція обладнання і трубопроводів. Чинний від 1990-01-01. Київ, 1989. 28 с.
5. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинний від 2022-01-09. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2021. 27 с.
6. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Чинний від 2023-01-03. Київ: Технічний комітет стандартизації ТК 302 «Енергоефективність будівель і споруд», 2022. 63 с.
7. ДСТУ 8943:2019. Труби сталеві електрозварні. Технічні умови. Чинний від 2021-01-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 23 с.
8. ДСТУ Б В.2.5-31:2007. Труби попередньо теплоізовані спіленим поліуретаном для мереж гарячого водопостачання та теплових мереж. Труби, фасони вироби та арматура. Технічні умови. Чинний від 2007-05-02. Київ: ДП «Центр СЕПРО тепломережа», 2007. 88 с.
9. Про теплопостачання: Закон України від 02 червня 2005 р. *Відомості Верховної Ради*. 2005. № 28. Ст. 373.
10. Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж: затв. М-вом палива та енергетики України від 14.02.2007 р., наказ № 71; зареєстр. в Міністерстві юстиції України 5.03.2007 р. за № 197/13464. Чинний з 05.03.2007. Харків: Форт, 2007. 176 с.
11. The possibility of combined regulation of heat supply systems as the basis of energy efficiency / O. Taradai, V. Bugai, O. Gvozdetskiy, S. Diachenko. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2022. 1(58). С. 74-81. URL: <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.2861>.

12. Economic dependence of the consumer on the feasibility to regulate the heat supply system efficiency / O. Taradai, V. Bugai, O. Gvozdetzkiy, S. Diachenko. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2022. 1(59). С. 52-57. URL: <https://doi.org/10.26906/znr.2022.59.2862>.
13. Досвід поетапного переобладнання загальнобудинкової вертикальної однокотлової системи опалення на поквартирну горизонтальну двокотлову / О. М. Тарадай, В. С. Бугай, О. В. Гвоздецький, С. В. Дяченко. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. Вип. 206. С. 53-62. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/tht_zbirn_206.pdf.
14. Modern Heating Systems for Multi-Story Residential Buildings / O. Taraday et al. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 1376 (2024) 012046. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85201154165&origin=resultslist>.
15. Вплив конструкції внутрішньобудинкових систем опалення на вибір режимів регулювання централізованого теплопостачання / О. М. Тарадай, В. С. Бугай, О. В. Гвоздецький, С. В. Дяченко. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: зб. праць* / Інститут промислової екології. Київ: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022. С. 66-74. URL: http://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/12/sbornik_2022.pdf.
16. Тарадай О. М., Гвоздецький О. В., Дяченко С. В. Сучасні квартирні системи опалення. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: зб. праць* / Інститут промислової екології. Київ: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2024. С. 124-129. URL: http://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/01/sbornik_2024_pp.pdf.
17. Reconstruction of heating systems of existing residential buildings by means of equipping apartment heating systems with heat meters / O. Taraday et al. *Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць* / ХНУБА, ХОТВ АБУ. Харків: ХНУБА, 2019. Вип. 3 (97). С. 70-74. URL: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/386/378>.
18. Алексахін О. О., Єна С. В., Гордієнко О. П. Розрахунок теплових втрат подавальними трубопроводами розгалужених теплових мереж. *Інтегровані технології та енергозбереження*. Харків, 2017. № 3. С. 51-56. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/86de994b-f4eb-4c45-b44f-1e16aced1f0d/content>.
19. Алексахін О. О. Обчислення втрат теплоти у мікрорайонних теплових мережах. *Комунальне господарство міст: зб. наук. праць*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. Вип. 114. С. 82-84.
20. Порівняння варіантів виконання розподільної теплової мережі мікрорайону / О. О. Алексахін, С. В. Єна, О. П. Гордієнко та ін. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2021. № 3. С. 51-56. URL: <http://ite.khpi.edu.ua/article/view/243852>.
21. Ганжа А. М., Марченко Н. А., Підкопай В. М. Обґрунтування варіантів реконструкції системи теплопостачання житлового масиву з використанням математичного моделювання теплових втрат при транспортуванні теплоносія. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. № 13(987). С. 51-56. URL: <https://surl.li/bntmiz>.
22. Ганжа А. М., Марченко Н. А., Підкопай В. М. Визначення надійності теплопостачання житлового масиву на основі системного математичного моделювання теплогідралічних процесів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. № 14(988). С. 142-146. URL: https://trubu.com.ua/image/data/prices/dsty_b_v_2_5_31_2007_trubu_teploizolovani.pdf.
23. Алексахін О. О., Бобловський О. В. Теплові і гідралічні режими мікрорайонних в умовах реформування централізованого теплопостачання: монографія. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 180 с.

24. Єнін П. М., Швачко Н. А. Теплопостачання. Ч. I «Теплові мережі і споруди» : навч. посіб. Київ: Кондор, 2007 244 с.
 25. Насосне обладнання Grundfos. URL: <https://www.grundfos.com/ua> (дата звернення 28.01.2025).
 26. Енергоресурс інвест. Вироби для теплопостачання та гарячого водопостачання. URL: <http://surl.li/wmkfyn> (дата звернення 28.01.2025). Назва з екрана.
 27. Комунальне підприємство «Харківські теплові мережі». URL: <https://www.hts.kharkov.ua/> (дата звернення 28.01.2025). Назва з екрана.
 28. Оператор ринку. URL: <https://www.oree.com.ua/> (дата звернення 28.01.2025). Назва з екрана.
-

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

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0851-8851>. E-mail: npp-tghv@ukr.net.

Міланко Ольга Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8013-3900>. E-mail: olgamalyavina@ukr.net.

Ткаченко Роман Борисович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3899-1826>. E-mail: roman.tkachenko@kname.edu.ua.

Юзбашьян Анна Петрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4468-5094>. E-mail: anyayuzbashyan@gmail.com.

Романенко Сергій Вікторович, старший викладач кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-8811-3070>. E-mail: etv1715@gmail.com.

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. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0851-8851>. Tel.: +38(050)88-624-88. E-mail: npp-tghv@ukr.net.

Milanko Olha, PhD (Tech). Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8013-3900>. E-mail: olgamalyavina@ukr.net.

Tkachenko Roman, PhD (Tech). Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3899-1826>. E-mail: roman.tkachenko@kname.edu.ua.

Yuzbashyan Anna, PhD (Tech). Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4468-5094>. E-mail: anyayuzbashyan@gmail.com.

Romanenko Serhii. Sr. lecturer of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-8811-3070>. E-mail: etv1715@gmail.com.

Статтю прийнято 10.02.2025 р.

УДК 620.9

STRENGTHENING UKRAINE'S ENERGY SECURITY THROUGH DIVERSIFICATION OF ENERGY SUPPLY SOURCES

PhD (Phys.-Math.) O. V. Zabarylo, lecturer J. A. Korotkykh,
postgraduate student P. O. Zabarylo

ЗМІЦНЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ ШЛЯХОМ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

Канд. фіз.-мат. наук О. В. Забаріло, старш. викл. Ю. А. Коротких,
асп. П. О. Забаріло

Abstract. The article voices the need to strengthen the country's energy security, in particular through the course towards energy independence. The diversification of energy sources is defined as one of the tools that contributes to the development of the energy sector with specific examples of the implementation of such a policy in developed EU countries, and the main stages of its implementation in Ukraine are also voiced. The potential of Ukraine is characterized in terms of renewable energy sources and the possibilities of their development against the background of the gradual abandonment of imported fossil fuels. The prospects for further research to improve the management process of energy generation sources are voiced.

Keywords: alternative energy, energy efficiency, diversification, energy security, energy resources.

Анотація. У статті зазначено про важливість енергетичного сектору для розвитку країни та необхідність посилення заходів, спрямованих на зміцнення енергетичної незалежності. Обґрунтовано важливість надійної системи енергетичної безпеки та перелічено заходи для її поетапного впровадження. Дано визначення диверсифікації джерел енергоресурсів як одного з інструментів, що сприяє розвитку енергетичного сектору. Відмічено основні аспекти переваг застосування диверсифікованої системи енергопостачання. Наведено конкретні приклади впровадження вищезазначеної політики енергетичної диверсифікації та енергоефективності в розвинутих країнах Європейського Союзу, стратегії, реалізовані в рамках впровадження комплексних структур енергоспоживання як основний орієнтир для розгортання аналогічних ініціатив на теренах України, зокрема проаналізовано досягнення в цьому напрямі станом на 2024 рік і перераховано основні перспективи на майбутнє. Визначено критичну необхідність переорієнтації вітчизняної системи користування джерелами енергогенерації на таку, що у своєму ядрі спирається на альтернативну енергетику, на фоні негативних наслідків від ведення бойових дій на території України впродовж останніх років, зокрема щодо економічних збитків. Розгорнуто охарактеризовано неосвоєний потенціал України в контексті найбільш перспективних джерел відновлюваної енергетики – сонячної, вітрової, гідроенергетики, геотермальної, енергії біомаси – і можливості їх освоєння в різних регіонах країни з урахуванням їхніх географічних, кліматичних і територіальних особливостей на фоні поступової переорієнтації сектору енергетики до більш диверсифікованої структури та відмовлення від імпортного викопного палива. Визначено перспективи подальших досліджень, у тому числі в контексті питань повоєнного відновлення економіки і промисловості,

підвищення екологічної чистоти і енергоефективності, енергетичної безпеки та можливого залучення новітніх інформаційних технологій для оптимізації процесу менеджменту джерел енергогенерації.

Ключові слова: альтернативна енергетика, енергоефективність, диверсифікація, енергетична безпека, енергетичні ресурси.

Introduction. Energy independence is a priority for the development of both the Ukrainian economy and the country as a whole, but at the same time, national security challenges threaten plans for the gradual implementation of relevant initiatives. The energy sector is one of the key sectors of the national economy, and uninterrupted and efficient energy supply has a direct impact on economic growth. And it is undeniable that only the development of a reliable energy security system will ensure the country's stable economic growth. It is directly depending on the sources of supply, the balance and structure of exports and imports of energy resources, the structure of consumption, political and internal stability and implementation involves a number of organizational, economic and legal measures, such as ensuring the stability of energy supplies, minimizing environmental impacts in the process of operating energy generation sources, diversifying them to reduce dependence, and developing and maintaining a rational pricing policy or tax incentives. The state's chosen course towards energy efficiency is fully correlated with above-mentioned priorities [1]. Taking into account the current conditions, among the above-mentioned areas of development, the most relevant and promising is ensuring the state's energy security through diversification of energy generation sources, as its implementation, among all the obvious advantages, is also conditioned by the foreign policy situation - Ukraine's economy, despite shifts in the right direction, still feels highly dependent on energy imports, not to mention the problems of excessive environmental pollution due to the use of outdated production equipment, energy.

Analysis of recent research and publications. Research into the essence, types and significance of diversification of activities

is reflected in the works of such specialists as: Boguslavsky E. I., Chernychenko A. O. [2], Drymalovska Kh. V. [3], Korinko M. D., Kuzmin O. E. [3], Peredalo Kh. S. and others. The problems and prospects of the development of the energy sector, including alternative energy, as one of the potential and optimal directions of diversification are studied by such scientists as: Domashenko M. D. [4], Domashenko V. S. [4], Garkusha V. V., Shkola V. Yu. [4], Shpak Y. N., Troyan M. Yu. [4], Yakovenko V. S., Zaverbnyi A. S. and others. The problems of diversification of energy supply in the economy are devoted to the works of such specialists as Amosha O. I., Belopolsky N. G., Borisyak O. V., Fedorenko V. G., Ivanechko N. R., aforementioned Shpak Y. N. [5], Turchenko D. K., aforementioned Zaverbnyi A. S. [5] and others. The theoretical foundations of energy security as a general economic category and the main factors, that influencing it, are considered in the works of Kuhar V. P., Shevtsov A. I., Shindlovsky A. K., Shlemko V. T. and others.

Defining the goal and objectives of the research. The goal of the research is to study the experience of energy diversification as one of the main tools for achieving the country's energy security. Examples of the implementation of such approach in European Union countries are studied. The potential of renewable energy sources in Ukraine is assessed as an alternative to meet energy consumption needs against the background of a gradual transition from the use of imported fossil fuels, depending on different regions geographical and climactic features. The prospects for further research to improve the management process of energy generation sources are voiced, in particular with the involvement of the latest information technologies.

The main part of the study. Energy diversification means using different energy sources, suppliers and routes to reduce dependence on a single resource or supplier. A country that diversifies its energy mix insulates itself from energy disruptions and strengthens its energy security. Of course, diversification cannot sufficiently protect importing countries from market risks (supply or price fluctuations, etc.), but it can reduce the risks associated with political turmoil or natural disasters. The following aspects are among the undoubted advantages of a diversified energy system [6]:

Political independence: Relying on another country to meet most of its energy needs can lead to intimidation, coercion and manipulation by the supplier in the long run. Dividing energy needs among different suppliers allows the importing country to reduce its dependence on a single supplier and strengthen its independence in global politics.

Economic growth: Energy diversification promotes economic growth. Obtaining energy from multiple sources and suppliers insulates an importing country from energy disruptions when one source or supplier is unable or unwilling to meet demand. Energy diversification ensures continued energy security, which creates a favorable environment for entrepreneurship, innovation and research and development.

Environmental protection: The development of renewable resources, such as solar and wind power, reduces the threat of energy shortages. Renewable resources emit few or no pollutants and have minimal environmental impact. Investments in renewable energy also stimulate innovation and employment growth.

The European Union is systematically switching to renewable energy sources and diversifying its natural gas suppliers to reduce dependence on a single importer in the event of a disruption or political conflict and increase the region's energy security. The EU countries are increasing the capacity of renewable energy sources, reducing the share of fossil fuels in their energy sector, and diversifying natural gas

suppliers (in particular, by attracting developers of fields in Eastern Europe, Cyprus and Israel) in order to reduce dependence on a single importer in the event of a failure or political conflict and increase the region's energy security. As part of the diversification of its energy consumption structure, the EU is implementing the following strategies:

1) promotion of renewable energy sources;

2) securing energy supplies from abroad (signing contracts with various suppliers);

3) large investments in research and development of energy technologies.

In January-June 2024, wind turbines and solar panels became the main source of energy in Europe for the first time, overtaking traditional energy sources (gas, coal, and oil) [7]. According to experts from the Ember climate think tank, their share is 50 %, taking into account other renewable energy sources such as hydropower. Experts note that electricity generation from the combustion of coal, oil and gas fell by 17 % in the first six months of 2024 compared to the same period a year earlier. Ember's report shows that 13 member states generated more electricity from wind and solar than from fossil fuels in the first half of the year. Germany, Belgium, Hungary and the Netherlands reached this milestone for the first time. The EU pays priority attention to energy security and, as part of its energy diversification, aims to reduce CO₂ emissions by 40 % by 2030 (as part of its renewable energy commissioning strategy). Countries' strategies to achieve their climate goals and comply with legislation by 2030 will determine the role of conventional and clean energy technologies in Europe. Experts predict that the total energy consumption in the EU will remain relatively unchanged over the next three decades. The International Energy Agency (IEA) estimates that by 2040, electricity demand in the EU will increase by 12-26 %. To meet this growing demand for electricity, the use of clean energy technologies will have to increase.

It is worth noting that the process of implementing energy sector diversity is heterogeneous and differs from case to case, as each country has a unique combination of natural resources, energy needs and geopolitical constraints and other factors that

are constantly changing. It's necessary to determine objective trends in energy consumption, analyze its structure and volumes and the main contradictions between the needs of economic growth and energy security.



Fig. 1. Map of the distribution of natural zones in Ukraine [8]

It is crucial for Ukraine to increase investment in the large-scale deployment of decentralized renewable energy sources, given that around 40 % of its energy infrastructure has been damaged by the fighting and the trend is unlikely to abate in the near future. The Kyiv School of Economics estimates direct losses in the electricity sector as a result of Russian attacks at USD 56.2 billion [9], and this amount is constantly growing. The economic potential for the development of renewable energy sources in Ukraine remains quite significant. The large areas of undeveloped territories, geographical and natural diversity create very favorable conditions for further diversification of the structure of energy generation sources

Diversification in the energy sector of Ukraine should be carried out in accordance with European standards, principles, and norms, taking into account the close interrelationships between the diversification of natural energy resources, their supply routes, etc. and the level of energy security of the

country [10]. The most promising for development in Ukraine are the following types of renewable energy: solar energy, wind energy, small river energy, geothermal energy and biomass energy.

Solar energy. Ukraine has sufficiently favorable conditions for the implementation of solar power plants. The average annual amount of total solar radiation received per 1 m² of surface in Ukraine ranges from 1070 kWh/m² in the northern part of the country to 1400 kWh/m² and above in the south of Ukraine. The distribution of the main climatic indicators is as follows: the radiation regime of the territory is characterized by a change in the duration of sunshine on average per year from 1690-1850 hours in the western regions of Polissya and Forest-Steppe to 2150-2450 hours in Crimea and on the coasts of the Black and Azov Seas.

Speaking about the disadvantages, it is worth noting that the use of solar energy requires the allocation of large areas of land for

the construction of solar power plants, and the photocells used to make solar panels contain toxic substances such as lead, cadmium, gallium, arsenic, etc.

Wind energy. In the national RES sector, wind energy is second only to solar energy in terms of total installed capacity. The distribution of wind energy potential across the territory is rather uneven and depends primarily on the

- distribution of wind speed and direction near the earth's surface;
- vertical wind profile, which depends on the type of underlying surface;
- the relief of the underlying surface and the distance to large bodies of water.

The analysis of the long-term dynamics of the average annual wind speed in recent years has shown that the average long-term wind speed in Ukraine varies from 2.5 m/s to 5.7 m/s at the height of the weather vane (≈ 10 m). The highest wind speeds are typical for the Azov Upland, the Black Sea Lowland, the Crimean and Carpathian Mountains, and the Volyn and Donetsk Uplands. Western winds are predominant in the western, central and northern regions, while eastern and northern winds prevail in the eastern and southern regions, including the temporarily occupied areas.

Mountainous areas are the most challenging for the construction of wind farms. Construction in these areas requires a significant increase in time and money spent on selecting wind farm sites, laying roads and power lines, delivering construction materials and cranes, maintenance, etc. Forest areas are also unattractive for wind farm construction (forests are natural barriers to wind flows. Even significantly lower than the lower edge of the wind turbine wheel, they increase the turbulence of the corresponding wind flow, which reduces the electricity output of the wind turbine and accelerates its wear and tear). The territory of the forest-steppe zone, which remains after the removal of forest areas and anthropogenic obstacles, is quite suitable for the implementation of cost-effective wind farm

investment projects. The steppe zone is the most attractive for such projects. Strong winds in the cold season and in the warm season reduce their strength, but compensate for this reduction with additional local winds - breezes. The presence of powerful seaports and motorway networks in the steppe zone simplifies the solution of logistics problems [11].

It is also worth noting that wind farms generate high-frequency noise, interfering with nearby settlements, and the generators of large wind turbines rotate at a speed close to the TV synchronization frequency, so large wind turbines can interfere with the reception of broadcasts at a distance of up to 1.6 kilometers.

Hydropower. Hydropower has the lowest cost among conventional and most unconventional technologies (efficiency of about 70-90 %) and is also characterized by a significant operational life.

According to the results of scientific research, the technical potential of small rivers alone in Ukraine is 1270 million kWh/year. And about 1000 million kWh/year of them have not yet been developed. The construction of small hydropower cascades provides an opportunity to efficiently convert hydropower potential into electricity and participate in managed flood protection. The highest values of technical potential in terms of hydropower in our country are concentrated in the following regions: Zakarpattia (35 %), Ivano-Frankivsk (16 %), Lviv (12 %), Chernivtsi (6 %), Kirovohrad (4 %) and Ternopil (3 %). The lowest values are inherent in the following regions: Odesa (0.37 %), Volyn (0.27 %), Kherson (0.18 %), Chernihiv (0.16 %), Zaporizhzhia (0.05 %) [12].

The disadvantage of small hydropower is the flooding of territories, the drying up of small rivers, and if the location of a dam or dams is not planned correctly, ecosystems may be altered and biodiversity may be lost, so it is worth taking a particularly responsible approach to the location of hydropower plants, taking into account all possible consequences.

Geothermal energy. It is conventionally divided into sub-geothermal, hydrothermal and

petrothermal. Unlike other renewable energy sources, the pace of expansion of geothermal energy production capacities in Ukraine is much slower, despite the fact that geothermal energy sources have certain advantages. They do not depend on the day or season, and the cost of thermal and electric geothermal energy is low due to the high utilization rate (0.8-0.95) and low operating costs.

The development of geothermal technologies for the exploitation of deep underground energy sources was concentrated on the Crimean Peninsula, as well as partially in Kherson and Zakarpattia regions.

At this stage, the most favorable conditions for the development of hydrothermal resources are characterized by the Precarpathian (Lviv, Ivano-Frankivsk, and partially Chernivtsi regions) and Zakarpattia (Zakarpattia region) troughs, the Dnipro-Donetsk depression (Chernihiv, Poltava, Sumy, Kharkiv, and Dnipro regions), the Steppe Crimea, and the Black Sea coast (Kherson and Odesa regions). Petrogeothermal resources are distributed throughout Ukraine, but their shallowest depths are observed in Zakarpattia, the inner Carpathian region and the southern part of Odesa and Kherson regions.

The disadvantages of developing geothermal energy sources are high capital investments in the early stages, such as the cost of energy equipment for converting geothermal energy sources or the cost of drilling.

Biomass energy. In recent years, there has been an upward trend in the potential of solid biomass, driven by increased agricultural productivity, changes in forestry, and changes in the management of domestic and industrial waste. The annual technically achievable energy potential in Ukraine in pre-war times was equivalent to 35 million tons, and its use would have saved about 40 billion cubic meters of natural gas annually. The largest potential of solid biomass is concentrated in Vinnytsia, Dnipropetrovsk, Zhytomyr, Kyiv, Odesa, Poltava, Sumy, Kharkiv and Chernihiv regions and amounts to about 2.0 million tons per year [13]. The main suppliers of raw materials for

energy needs are agriculture and forestry, in particular the cultivation of energy crops, which are certain types of trees and plants specially grown for the production of solid biofuels. Peat accounts for a significant share of solid biomass. The annual growth of the peat layer is about 1 mm, and the corresponding amount of peat can be considered renewable. Three Polissya regions have the largest peat deposits: Volyn, Rivne and Chernihiv. In their territories, 836 deposits have been discovered and explored (38 % of all deposits in the country), and geological reserves of peat amount to 1.0 billion tons.

It is also worth noting the trend in recent months of using the infrastructure of gas storage facilities previously used to store imported natural gas from Russian fields to accumulate biomethane. In synergy with the research of the American startup Quino Energy on the transformation of oil reservoirs into a cluster of flow batteries, this direction looks more than promising. Existing equipment adapted to the new realities will help reduce costs and promote the development of this area of green energy, which in turn will only strengthen the course towards diversification of energy generation sources.

Effective diversification of resources and ways of obtaining them in the energy sector will help it reach a qualitatively higher level of functioning and, accordingly, reduce energy risks, increase profitability, etc. This process on a countrywide scale should be evolutionary (clearly synchronized with economic development), structured (step by step, analyzing the business environment, favorable market trends in the global energy sector, assessing the sector's potential, risk level, etc.), and comprehensive (combining goals, motives, and conditions for energy diversification), multidimensional (combining different areas of development), targeted (identifying diversification goals), emergent (updating the energy system, acquiring new properties, etc.), dynamic (continuous development of the country's energy sector), synergistic

(interaction with the country's development strategies).

The following steps should be considered for the gradual introduction of a diversified energy supply system [14]:

- Establish a legal framework for energy policy that attracts investment, rewards entrepreneurship and innovation, and limits inefficiency and waste.
- Enter into partnerships with the private sector to identify and develop alternative energy sources.
- Work with experts to determine the best mix of available domestic and foreign energy sources.
- Work with the international community to introduce and enforce environmental standards related to energy exploration and production.

Conclusions. The massive use of renewable energy sources has a number of undeniable advantages, but it is worth noting the gradual independence from global fuel price fluctuations, which will only strengthen the task of the national strategy to ensure energy security. Renewable energy sources are also expected to become a key component of the country's post-war recovery. However, without appropriate support for the introduction of alternative energy sources at the state level, without an effective energy diversification policy, the pace of capacity expansion in the country, despite its considerable potential, will be insufficient. Under current conditions, one of the ways to promote the development of the green energy sector is to develop and implement an appropriate model of rational distribution of energy generation sources using the latest information technologies [15].

References

1. Energy Strategy of Ukraine until 2035: Security, Energy Efficiency, Competitiveness. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>.
2. Boguslavskiy E. I., Chernychenko A. O. Choosing the Optimal Method of Enterprise Diversification. *Effective Economy*. 2013. No. 10. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2424>.
3. Drymalovska Kh. V., Kuzmin O. E., Peredalo Kh. S. Factors influencing the diversification of enterprise activities. *Bulletin of the National University «Lviv Polytechnic». Management and Entrepreneurship in Ukraine: Stages of Formation and Development Problems*. 2013. No. 769. P. 143-148.
4. Domashenko M. D., Shkola V. Yu., Troyan M. Yu., Domashenko V. S. Development of alternative (clean) energy sources: EU experience. *Business Inform*. 2021. No. 4. P. 48–53.
5. Zaverbnyi A. S., Shpak Y. N. Problems of harmonious development of energy supply and energy efficiency of the economy in the context of European integration. *ECONOMICS: time realities*. 2019. No. 4(44). P. 40–48.
6. Oleksiuk V. M. Energy diversification as a factor of economic growth. *Mechanism of economic regulation*. 2013. No. 4. P. 174-182.
7. State of the wind energy sector in Europe in the first half of 2024. URL: <https://100re.org.ua/stan-vitroenergetychnogo-sektoru-u-yevropi-za-i-pivrichchya-2024-roku/>.
8. Kudrya S. O. Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine, ed. S. O. Kudrya. Kyiv: Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine, 2020. 82 p.
9. Damages and losses of the energy sector of Ukraine as a result of a full-scale Russian invasion exceeded \$56 billion – KSE Institute estimate as of May 2024. URL: <https://kse.ua/ua/about-the->

school/news/zbitki-ta-vtrati-energetichnogo-sektoru-ukrayini-vnaslidok-povnomasshtabnogo-vtorgnennya-rosiyi-perevishhili-56-mlrd-otsinka-kse-institute-stanom-na-traven-2024-roku.

10. Sotnyk I. M., Kulyk L. A. Energy efficiency in Ukraine: new challenges and major barriers to its implementation. *International Journal of New Economics and Social Sciences*. 2016. № 2(4). P. 162-173.

11. Kudrya S. O. Renewable energy sources. Ed. S. O. Kudrya. Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences. 2020. 392 p.

12. Omelchenko V. The Renewable Energy Sector of Ukraine Before, During and After the War. Kyiv: Razumkov Center, 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>.

13. Plosky V. O., Zabarylo P. O. Current state of alternative energy potential of Ukraine. *Materials of the III International Scientific and Practical Conference «Green Construction»*. 2024. P. 118-122.

14. Mykityn O. Z. Strategic problems of diversification in the energy sector of the economy of Ukraine and prospects for their solution in the context of European integration. *Economy and Society*. 2021. No. 32.

15. Zabarylo P. O., Zabarylo O. V., Korotkykh J. A. Application of neural networks for the optimization in using of alternative energy sources processes. *Proceedings of XIX international conference on modern achievements of science and education*. P. 72-75.

Забарило Олексій Віталійович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна. ORCID: 0000-0003-4951-8882. Тел: 050-649-99-85. E-mail: zabarylo.ov@knuba.edu.ua.

Коротких Юлія Анатоліївна, старший викладач, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна. ORCID: 0000-0002-9905-8151. Тел: 050-977-77-07. E-mail: korotkykh.iaa@knuba.edu.ua.

Забарило Павло Олексійович, аспірант, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна. ORCID: 0009-0003-7712-3674. Тел: 063-829-22-99. E-mail: zabarylo_po-2023@knuba.edu.ua.

Zabarylo Oleksiy Vitaliyovych, PhD in physical-mathematical sciences, associate professor, Kiev National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, Kiev, Ukraine. ORCID: 0000-0003-4951-8882. Тел: 050-649-99-85. E-mail: zabarylo.ov@knuba.edu.ua.

Korotkikh Julia Anatoloyivna, senior lecturer, Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine. ORCID: 0000-0002-9905-8151. Тел: 050-977-77-07. E-mail: korotkykh.iaa@knuba.edu.ua.

Zabarylo Pavlo Oleksiyovich, postgraduate student, Kiev National University of Construction and Architecture, Kiev, Ukraine. ORCID: 0009-0003-7712-3674. Тел: 063-829-22-99. E-mail: zabarylo_po-2023@knuba.edu.ua.

Статтю прийнято 26.02.2025 р.

УДК 624.012.4-183.2:624.046.2

ДО ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ БІБЕТОННИХ АРМОВАНИХ БАЛОК ПРЯМОКУТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Викладач вищої категорії Д. Б. Романенко,
кандидати техн. наук О. А. Крупченко, П. А. Юрко

TO DETERMINE THE BEARING CAPACITY OF BI-CONCRETE REINFORCED BEAMS OF RECTANGULAR CROSS-SECTION

Teacher of the highest category D. B. Romanenko,
PhD (Tehn.) O. A. Krupchenko, PhD (Tehn.) P. A. Yurko

Анотація. У статті викладено рекомендації для розрахунку несучої здатності двошарових залізобетонних згинаних елементів із бетоном вищого класу у стиснутій зоні. Для цього застосовано дві удосконалені методики, базовані на класичній моделі напружено-деформованого стану композитного бруса та рівноваги нормальних перерізів за методом граничних станів. Застосовуючи класичну модель напружено-деформованого стану багатошарового бруса зі згином для розрахунку бібетонних армованих балок прямокутного поперечного перерізу, поперечний переріз балки розбито на три прямокутні шари – бетон вищого класу у стиснутій зоні, бетон нижчого класу у розтягнутій зоні та поздовжнє робоче армування в розтягнутій зоні.

Ключові слова: несуча здатність, згин, композитний брус, бібетон, армування, прямокутний поперечний переріз.

Abstract. As is known, the tensile concrete is not considered in calculating the overall load-bearing capacity of reinforced concrete structures; it only increases their weight and, consequently, the manufacturing costs. Therefore, replacing the tensile concrete in such structures with a less expensive material, such as lower-grade concrete or concrete with porous aggregates, is a relevant issue. The purpose of this work is to develop recommendations for calculating the load-bearing capacity and determining the deformations of two-layer reinforced concrete flexural elements with higher-grade concrete in the compressed zone. To achieve this, two advanced methods are used, based on the classical model of the stress-strain state of a composite beam and the equilibrium of normal sections using the limit state method. When applying the classical model of the stress-strain state of a multilayer beam in bending to calculate bi-concrete reinforced beams with a rectangular cross-section and higher-grade concrete in the compressed zone, the cross-section of the beam is divided into three rectangular layers – higher-grade concrete in the compressed zone, lower-grade concrete in the tensile zone, and longitudinal working reinforcement in the tensile zone. For convenience, the coordinates of the extreme points of each layer should be determined relative to the lowest point of the cross-section. A comparison was made to assess the convergence of the theoretical, numerical, and experimental results obtained. The study involved five types of bi-concrete beams with rectangular cross-sections of 100×150 mm and a working length of 1200 mm, each with varying height ratios of different concrete classes. The upper compressed portion of the beams was made from class C20/25 concrete, while the lower tensioned portion utilized class C12/15 concrete. The working reinforcement consisted of two Ø12 A400C reinforcement bars.

Keywords: *bearing capacity, bending, composite beam, bi-concrete, reinforcement, rectangular cross-section.*

Вступ. Розвиток номенклатури будівельних конструкцій є комплексним процесом, що охоплює два основні напрями: по-перше, пошук інноваційних рішень, які включають створення принципово нових типів елементів із використанням як одного матеріалу, так і комбінації різних матеріалів для забезпечення їхньої взаємовигідної сумісної роботи; по-друге, послідовне вдосконалення наявних будівельних виробів через зменшення їхньої ваги зі збереженням несучої здатності та підвищення технологічності виготовлення.

Особливо це стосується залізобетонних конструкцій, призначених для сприйняття згинальних навантажень. Проблема полягає в тому, що розтягнутий бетон практично не бере участі в забезпеченні несучої здатності конструкції, натомість лише збільшує її загальну вагу та витрати на виробництво. Саме тому актуальним напрямом досліджень є заміна розтягнутого бетону більш економічними матеріалами, такими як бетон нижчого класу міцності або бетон з пористими заповнювачами, що дасть змогу оптимізувати конструктивні та економічні параметри будівельних виробів.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Для сучасного будівництва характерне унікальне поєднання інноваційних і відновлювальних конструктивно-планувальних рішень, викликаних як плановим розвитком, так і наслідками воєнних дій. Це висуває принципово нові вимоги до будівельних конструкцій, зокрема необхідність створення багатофункційних елементів, які не лише відповідають технічним параметрам, але й органічно інтегруються в громадський простір. Основними критеріями для сучасних несучих конструкцій стають економічна доцільність, висока надійність,

живучість і здатність витримувати складні умови експлуатації, включаючи можливість швидкого та ефективного відновлення пошкоджених ділянок. За такого підходу можна не лише забезпечити технічну функційність споруд, але й створити більш стійке та адаптивне середовище життєдіяльності.

Тема роботи відповідає сучасним напрямам науково-технічної політики держави щодо енергоефективності та ресурсозбереження, у тому числі в будівництві, згідно з розпорядженням КМУ від 17.12.2008 р. № 1567-р «Про програми підвищення енергоефективності та зменшення споживання енергоресурсів».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багатошарові залізобетонні конструкції утворюються під час як нового будівництва з метою зменшення ваги чи покращення теплофізичних властивостей конструкцій, так і підсилення пошкоджених конструкцій із метою відновлення чи покращення їхніх експлуатаційних властивостей [1].

У науковій школі в Київському національному університеті будівництва і архітектури під керівництвом А. Я. Барашикова порівняно підсилення експериментально випробуваних різних балок: непідсилених, підсилених шаром сталевібробетону, полімербетоном, армованим полімербетоном, дрібнозернистим бетоном і арматурою тощо. Зокрема, Е. М. Блалі порівняв ефективність методів підсилення залізобетонних згинаних елементів [2]. Д. В. Попруга дослідив міцність стикових з'єднань з підсиленням залізобетонних згинаних елементів у стиснутій зоні [3]. І. О. Цибульник дослідив підсилення залізобетонних плит сталевібробетоном [4].

Також у Києві у ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» проведені експериментальні

та теоретичні дослідження балок із тріщинами після підсилення [5].

У Національному університеті «Львівська політехніка» І. В. Задорожнікова дослідила підсилення стиснутої зони як засіб відновлення експлуатаційних якостей залізобетонних згинальних елементів [6]; А. В. Мурин досліджував залізобетонні конструкції, підсилені в розтягнутій зоні зовнішньою композитною арматурою [7]; А. Б. Боярчук виявляв вплив тріщин, які мали місце перед підсиленням, а також вплив міцності контактних швів на механічні властивості підсилених балок [8].

У Харківській національній академії міського господарства М. Ю. Смолянinov під керуванням Л. М. Шутенка і М. С. Золотова дослідив несучу здатність залізобетонних згинальних елементів, підсилених обіймою з акрилового полімеррозчину [9].

У Львівському національному аграрному університеті А. В. Мазурак і В. М. Калітовський дослідили міцність і деформативність залізобетонних балок, підсилених за технологією торкретування [10].

У програмах скінченно-елементного моделювання враховують родовідну нелінійність, що виникає під час підсилення експлуатованих конструкцій [11].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Проте залишається не повністю розкритим питання визначення точної несучої здатності багатошарових залізобетонних конструкцій, виготовлених як із новим будівництвом, так і особливо під час підсилення з урахуванням наявного напружено-деформованого стану та геометричних характеристик підсилюваної частини конструкції.

Визначення мети та задачі дослідження: розробити рекомендації для розрахунку несучої здатності та визначення деформацій двошарових залізобетонних згинальних елементів із бетоном вищого класу у стиснутій зоні.

Основна частина дослідження. Основне завдання теоретичних досліджень, викладених нижче, – удосконалення методики та розроблення практичних рекомендацій оцінювання міцності та напружено-деформованого стану нормальних перерізів двошарових залізобетонних балок прямокутного поперечного перерізу з бетоном вищого класу у стиснутій зоні, враховуючи при цьому пружно-пластичні властивості бетону і сталевго армування. Структурно-логічна схема проведення теоретичних досліджень армованих бібетонних балок показана на рис. 1.

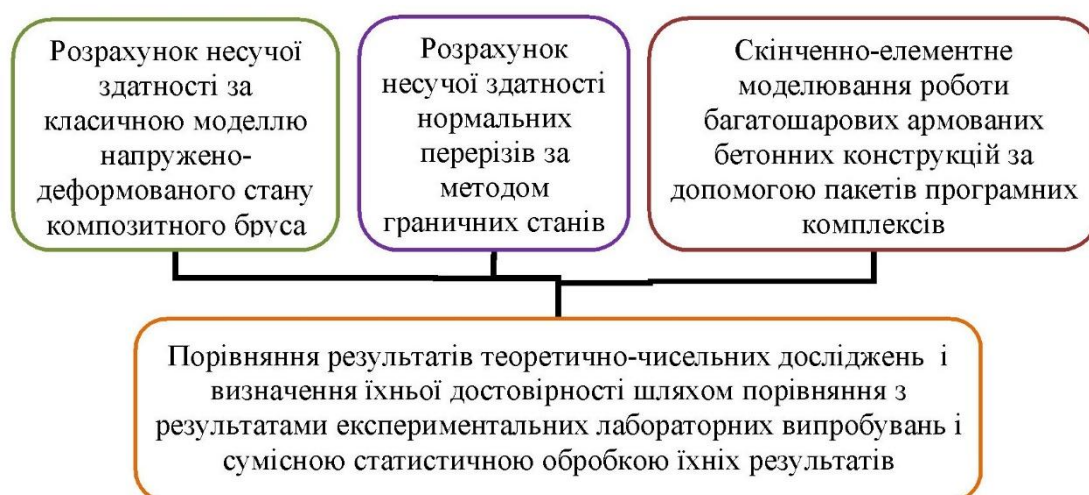


Рис. 1. Структурно-логічна схема теоретичних досліджень армованих бібетонних балок

У першій розглянутій методиці для розрахунку армованих бібетонних балок застосовано класичну модель напружено-деформованого стану композитного бруса зі згином. За цією моделлю можна розраховувати згинальні елементи, що включають шари з матеріалів, які відрізняються фізико-механічними власти-

востями, розташовані симетрично відносно вертикальної осі поперечного перерізу (два шари бетону та робоче армування – на рис. 1) і пов'язані нерозривністю переміщень на контактній межі шарів.

Модуль пружності, за класичною моделлю багат шарового бруса зі згином у довільній точці,

$$E = E(x, y) = \sum_{k=1}^n E_k \left\{ \theta(x - x_{l_k}) - \theta(x - x_{n_k}) \right\} \cdot \left\{ \theta(y - y_{n_k}) - \theta(y - y_{e_k}) \right\}; \quad (1)$$

де $\theta(x)$, $\theta(y)$ – узагальнені функції Хевісайда,

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}; \quad \theta(y) = \begin{cases} 0, & y \leq 0 \\ 1, & y > 0 \end{cases}; \quad (2)$$

$x_{l_k}; x_{n_k}; y_{n_k}; y_{e_k}$ – координати лівої і правої, нижньої й верхньої граней k -го шару.

Із формул (1), (2) випливає, що з усіх доданків сум у виразі (1) залишаються лише ті, що належать точці з координатами x та y k -го шару.

За класичною моделлю багат шарового бруса зі згином, нормальні та дотичні напруження в перерізі визначають як

$$\sigma_z = E \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \xi_0(y) + C_1 \right); \quad (3)$$

$$\tau_{zy} = \frac{d^3 w}{dz^3} f_0(y); \quad (4)$$

де $w(z)$ – функція прогину згинального елемента;

$\xi_0(y)$ – функція розподілу поздовжніх переміщень і нормальних напружень за висотою перерізу;

$f_0(y)$ – функція розподілу дотичних напружень за площею перерізу вздовж координати z ;

C_1 – стала інтегрування, що характеризує поздовжню деформацію перерізу на початку координати z і визначена умовами закріплення кінців стрижня; майже для всіх випадків закріплень $C_1 = 0$.

Функції $\xi_0(y)$ і $f_0(y)$ визначають за формулами

$$\xi_0(y) = \frac{B_0(y_e)}{B(y_e)} - \psi_0(y); \quad (5)$$

$$f_0(y) = \frac{1}{b(y)} \left(B_0(y) - \frac{B_0(y_e)}{B(y_e)} B(y) \right); \quad (6)$$

$$\text{або } f_0(y) = -\frac{1}{b(y)} \sum_{k=1}^n E_k b_k \left(\theta(y - y_{n_k}) \int_{y_{n_k}}^y \xi_0(y) dy - \theta(y - y_{e_k}) \int_{y_{e_k}}^y \xi_0(y) dy \right). \quad (7)$$

Застосовуючи класичну модель напружено-деформованого стану багат шарового бруса зі згином для розрахунку бібетонних армованих балок прямокутного поперечного перерізу із бетоном вищого класу у стиснутій зоні, поперечний переріз балки розбито на три прямокутні шари – бетон вищого класу у стиснутій зоні 1, бетон нижчого класу в розтягнутій зоні 2 та поздовжнє робоче армування 3 у розтягнутій зоні (рис. 2). Координати крайніх точок кожного шару для зручності слід визначати відносно найнижчої точки перерізу.

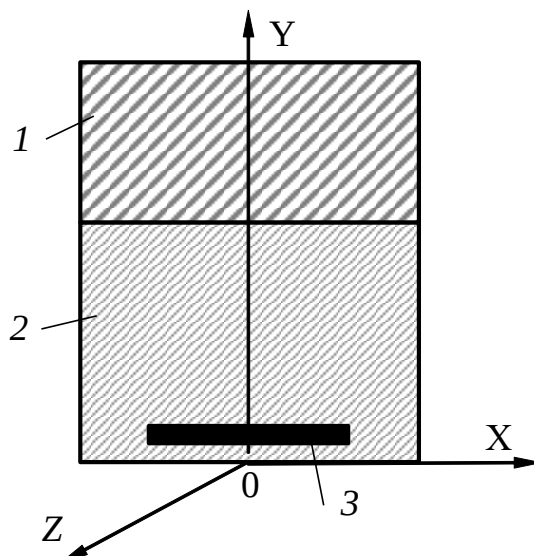


Рис. 2. Схема поділу поперечного перерізу на шари

Знайдемо функції $B(y)$ і $B_0(y)$ для балки, поперечний переріз якої складається із трьох шарів (рис. 2):

$$B(y) = \sum_{k=1}^3 E_k b_k \left(\theta(y - y_{n_k}) \int_{y_{n_k}}^y dy - \theta(y - y_{e_k}) \int_{y_{e_k}}^y dy \right) = \sum_{k=1}^3 E_k b_k \left[\theta(y - y_{n_k}) (y - y_{n_k}) - \theta(y - y_{e_k}) (y - y_{e_k}) \right]; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} f_0(y) &= -\frac{1}{b(y)} B_0(y) = \sum_{k=1}^3 E_k b_k \left(\theta(y - y_{n_k}) \int_{y_{n_k}}^y \psi_0(y) dy - \theta(y - y_{e_k}) \int_{y_{e_k}}^y \psi_0(y) dy \right) = \\ &= \sum_{k=1}^3 E_k b_k \left[\theta(y - y_{n_k}) \left(\frac{(y - y_n)^2}{2} - \frac{(y_{n_k} - y_n)^2}{2} \right) - \theta(y - y_{e_k}) \left(\frac{(y - y_n)^2}{2} - \frac{(y_{e_k} - y_n)^2}{2} \right) \right]; \end{aligned} \quad (9)$$

де $\psi_0(y)$ – функція, що описує розподіл лінійних деформацій за висотою перерізу і являє собою пряму лінію, яка відповідає гіпотезі плоских перерізів:

$$\psi_0(y) = \int_{y_n}^y dy = y - y_n. \quad (10)$$

Ураховуючи залежності (8), (9), функції (5) – (7), що входять до складу функцій напружень, матимуть вигляд

$$\xi_0(y) = \frac{B_0(y_e)}{B(y_e)} - (y - y_n); \quad (11)$$

$$f_0(y) = -\frac{1}{b(y)} \sum_{k=1}^3 E_k b_k \left[\theta(y - y_{H_k}) \left(\frac{B_0(y_{\theta})}{B(y_{\theta})} (y - y_{H_k}) - \frac{(y - y_{H_k})^2}{2} + \frac{(y_{H_k} - y_H)^2}{2} \right) - \right. \\ \left. - \theta(y - y_{\theta_k}) \left(\frac{B_0(y_{\theta})}{B(y_{\theta})} (y - y_{\theta_k}) - \frac{(y - y_{\theta_k})^2}{2} + \frac{(y_{\theta_k} - y_H)^2}{2} \right) \right]. \quad (12)$$

Знаючи дотичні напруження τ_{zy} на межі контакту двох шарів бетону, можна визначити зсувне зусилля T , яке виникає в контактній площині двох різних шарів бетону:

$$T = \int_A \tau_{zy} dA = b_2 \int_0^z \tau_{zy} dz. \quad (13)$$

Для балки, яка має ділянку чистого згину, дотичні напруження τ_{zy} відсутні на другій ділянці (у зоні чистого згину (рис. 3)), тобто зсувне зусилля виникає тільки на першій і третій ділянках і дорівнює

$$T = b_2 \int_0^z \frac{dw^3}{dz^3} f_0(y_{\theta_2}) dz = \frac{Fz}{EI} b_2 f_0(y_{\theta_2}); \quad (14)$$

де b_i – ширина i -го шару в перерізі композитного бруса.

Прогини бібетонних армованих балок за класичною моделлю напружено-деформованого стану багат шарового бруса визначали за уточненим методом початкових параметрів, який ґрунтується на диференціальних залежностях для елементарної ділянки балки довжиною dz , що зазнає деформацій згину і зсуву.

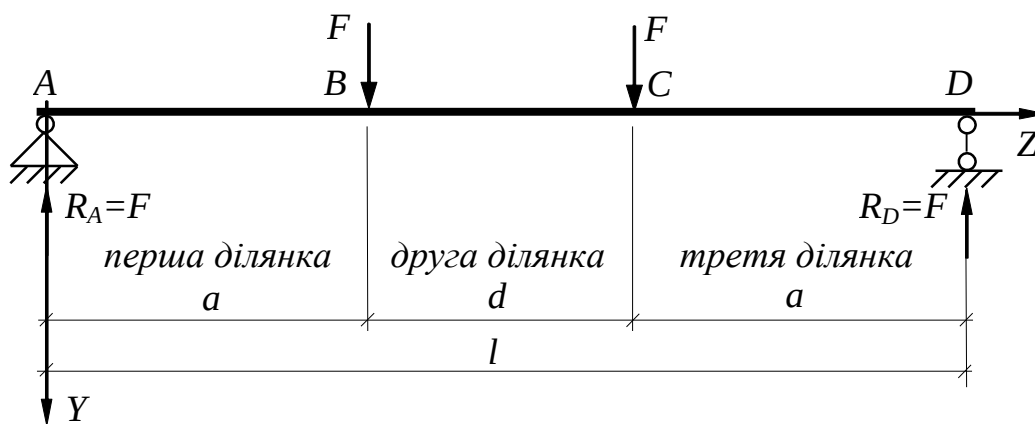


Рис. 3. Розрахункова схема балки, за якою були експериментально випробувані дослідні зразки, із ділянкою чистого згину

За другою розглянутою методикою оцінювання міцності нормального перерізу бібетонних армованих балок подано на основі сумісного рішення рівняння рівноваги поздовжніх сил відповідно до

схеми внутрішніх зусиль, що виникають у поперечному перерізі.

Висоту стиснутої зони перерізу x за умови проходження нульової лінії в бетоні

вищого класу (рис. 4) визначають за формулою

$$x = \frac{f_{yd} A_s}{f_{cd1} b}. \quad (15)$$

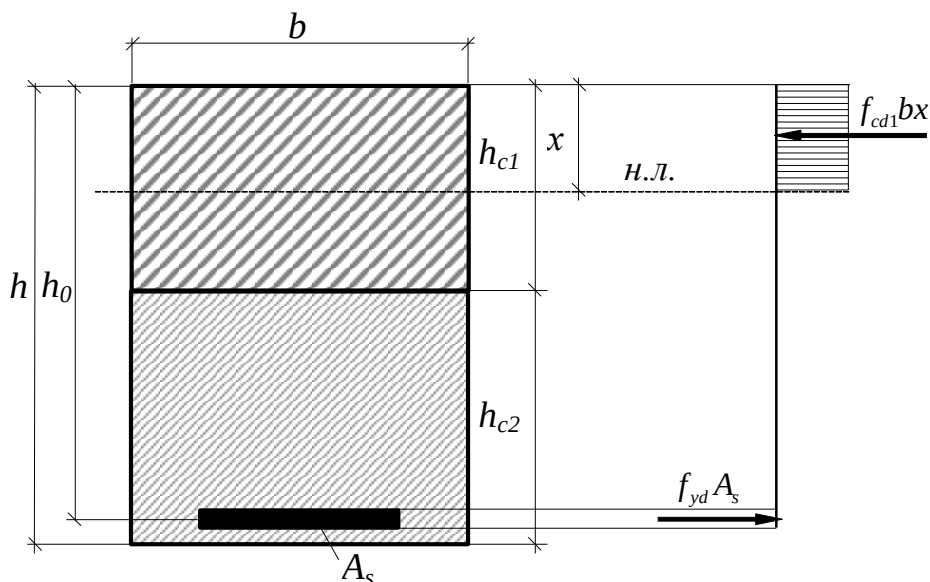


Рис. 4. Схема внутрішніх зусиль у нормальному перерізі за умови проходження нульової лінії в бетоні вищого класу

Міцність нормального перерізу:

- за умови $\sum M = 0$ відносно центра ваги стиснутої зони бетону

$$M_{розр} = f_{yd} A_s (h_0 - 0.5x); \quad (16)$$

- умови $\sum M = 0$ відносно центра ваги поздовжнього робочого сталевго армування

$$M_{розр} = f_{cd1} b x (h_0 - 0.5x). \quad (17)$$

Висоту стиснутої зони перерізу x за умови проходження нульової лінії в бетоні

меншого класу (рис. 5) визначають за формулою

$$x = \frac{f_{yd} A_s - b h_{c1} (f_{cd1} - f_{cd2})}{f_{cd2} b}. \quad (18)$$

Міцність нормального перерізу:

- за умови $\sum M = 0$ відносно центра ваги стиснутої зони бетону

$$M_{розр} = f_{yd} A_s (h_0 - 0.5x); \quad (19)$$

- умови $\sum M = 0$ відносно центра ваги поздовжнього робочого сталевго армування

$$M_{розр} = f_{cd1} b h_{c1} (h_0 - 0.5h_{c1}) + f_{cd2} b (x - h_{c1}) (h_0 - 0.5(h_{c1} + x)). \quad (20)$$

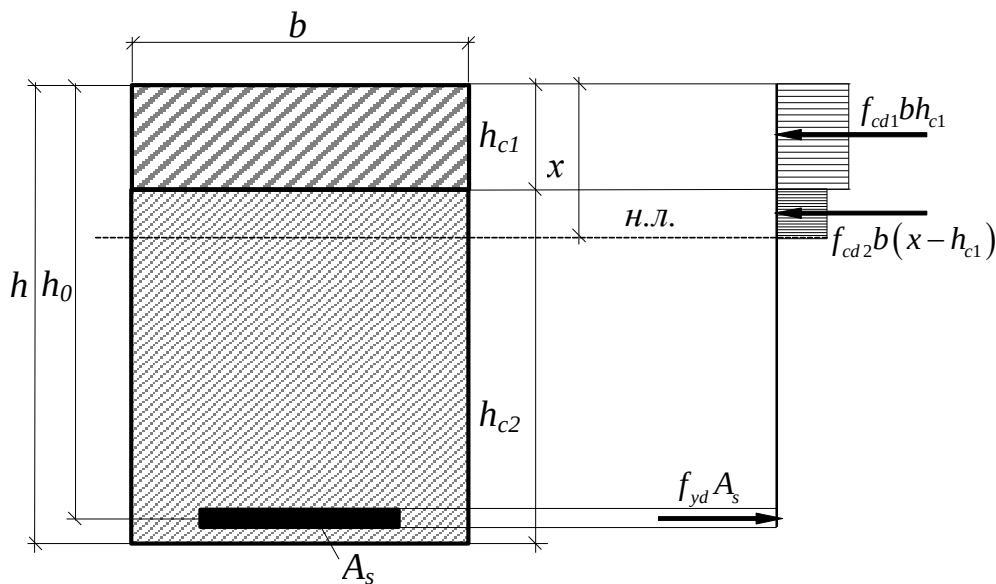


Рис. 5. Схема внутрішніх зусиль у нормальному перерізі за умови проходження нульової лінії в бетоні меншого класу

Для побудови повної діаграми $\sigma_c - \varepsilon_c$ і визначення напружень у стиснутій зоні бетону можна використовувати залежність згідно з ДСТУ Б В.2.6-156:2010 для опису діаграми стиску бетону.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у цьому напрямі. Розроблено рекомендації для розрахунку несучої здатності

двошарових залізобетонних згинаних елементів із бетоном вищого класу у стиснутій зоні. Для цього застосовано дві удосконалені методики, базовані на класичній моделі напружено-деформованого стану композитного бруса та рівноваги нормальних перерізів за методом граничних станів.

Список використаних джерел

1. Типові пошкодження несучих конструкцій складських і виробничих будівель та шляхи запобігання їх утворення / С. Ф. Пічугін, О. В. Семко, Г. М. Трусов та ін. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне: НУВГтаП, 2012. Вип. 23. С. 715–720.
2. Барашиков А. Я., Блалі ель Мустафа. Вплив способу підсилення на міцність, тріщиностійкість та прогини залізобетонних балок. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне: НУВГтаП, 2003. Вип. 9. С. 416–424.
3. Попруга Д. В. Тріщиностійкість та деформативність підсилених залізобетонних елементів. *Матеріали науково-технічної конференції «Проблеми будівництва – 2008»*. Кривий Ріг : КТУ, 2008. С. 86–89.
4. Барашиков А. Я., Журавський О. Д., Цибульник І. О. Дослідження попередньо-напружених плит до та після підсилення шаром сталевібробетону. *Будівельні конструкції*. Київ, НДІБК, 2004. Вип. 60. С. 551–558.

5. Белоконь А., Жарко Л., Овчар В., Фесенко О. Випробування нерозрізної залізобетонної балки з консолями та тріщинами підсиленої вуглепластиком. *Наука та будівництво*. Київ, 2020. Вип. 25(3). С. 47–54. <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v25i3.5>.
 6. Задорожнікова І. В. Розрахунок згинальних залізобетонних елементів підсиленіх у стиснутій зоні шаром полімербетону. *Комунальне господарство міст*. Київ: Техніка, 2005. Вип. 67. С. 42–46.
 7. Мурин А. Я., Добрянський Р. З. Дослідження роботи залізобетонних балок, підсиленіх наклеюванням композитної арматури. *Вісник ДонНАБА*. Макіївка, 2005. Вип. 4(52). С. 254–257.
 8. Сунак О. П., Боярчук Б. А. Напружено-деформований стан підсиленіх залізобетонних балок при короткочасному навантаженні. *Міжвузівський збірник (за напрямком «Інженерна механіка»)*. Наукові нотатки. Луцьк: ЛДТУ, 2002. Вип. 11. С. 260–267.
 9. Смолянін М. Ю. Розрахунок несучої здатності згинаних залізобетонних елементів, підсиленіх обоймою із акрилового полімеррозчину. *Комунальне господарство міст*. Київ: Техніка, 2008. Вип. 81. С. 33–40.
 10. Мазурак А. В., Калітовський В. М. Міцність і деформативність експериментальних залізобетонних балок, підсиленіх і виготовленіх за технологією торкретування. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. Серія: Теорія і практика будівництва. Львів, 2010. № 664. С. 78–82.
 11. Гасенко А. В., Кириченко В. А., Крупченко О. А. Чисельні дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних ребристих плит покриття. *Зб. наук. праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава: ПолтНТУ, 2013. Вип. 4(39). С. 78–83.
-

Романенко Дмитрій Борисович, магістр з будівництва, викладач вищої категорії, ВСП «Рубіжанський фаховий коледж», ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка». ORCID iD: 0009-0004-1265-4535. Тел.: +38 (066) 363-28-74. E-mail: alpintel@ukr.net.

Крупченко Олександр Анатолійович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу досліджень технічного стану будівель та споруд при небезпечних геологічних процесах, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». ORCID iD: 0000-0002-6075-5937. Тел.: +38 (093) 688-41-95. E-mail: krupchenko.alex@gmail.com.

Юрко Павло Анатолійович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу досліджень технічного стану будівель та споруд при небезпечних геологічних процесах, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». ORCID iD: 0000-0002-3485-435X. Тел.: +38 (066) 910-95-39. E-mail: pa.yurko@gmail.com.

Romanenko Dmytri, master's degree in construction, teacher of the highest category The Separated Structural Subdivision Rubizhne Professional, College of State Institution «Luhansk Taras Shevchenko National University». ORCID iD: 0009-0004-1265-4535. E-mail: alpintel@ukr.net.

Krupchenko Oleksandr, PhD (Tech.), senior researcher of the department of research into the technical condition of buildings and structures under dangerous geological processes State Enterprise «State Research Institute of Building Constructions». ORCID iD: 0000-0002-6075-5937. E-mail: krupchenko.alex@gmail.com.

Yurko Pavlo, PhD (Tech.), senior researcher of the department of research into the technical condition of buildings and structures under dangerous geological processes State Enterprise «State Research Institute of Building Constructions». ORCID iD: 0000-0002-3485-435X. E-mail: pa.yurko@gmail.com.

Статтю прийнято 12.03.2025 р.

УДК 624.012.35:620.173/174

ВИЗНАЧАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ СТИСНУТОГО БЕТОНУ ЗА ДІЇ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Канд. техн. наук О. В. Ромашко-Майстрок

MAIN PARAMETERS OF THE DEFORMATION DIAGRAM OF COMPRESSED CONCRETE UNDER THE DYNAMIC LOADS

PhD. (Tech.) O. V. Romashko-Maistruk

Анотація. Стаття присвячена визначальним параметрам діаграми деформування стиснутого бетону за дії динамічних навантажень. Отримано аналітично обґрунтовану функцію гранично можливих значень коефіцієнта динамічного зміцнення бетону (DIF). Показано, що DIF залежить не тільки від швидкості деформування стиснутого бетону, але і його загальновідомої інтегральної характеристики – коефіцієнта пружно-пластичності. Виявлено взаємозв'язок між коефіцієнтами пружно-пластичності бетону за дії динамічних і статичних навантажень. Встановлено функціональну залежність рівня деформативності стиснутого бетону від його класу та швидкості деформування бетону.

Ключові слова: бетон, діаграма, швидкість деформування, коефіцієнт динамічного зміцнення, деформативність, коефіцієнт пружно-пластичності.

Abstract. The article is devoted to the features of modeling the deformation diagram of compressed concrete under the dynamic loads action. The specified modeling involves the transformation of the standard deformation diagram of compressed concrete, obtained during static load tests, into a calculated one. It is aimed at the further development of the generalized deformation-force model of concrete and reinforced concrete resistance to force effects. The improved concrete deformation model is based on the law of conservation of the specific potential energy of concrete ultimate deformation (destruction), regardless of its strain rate. A critical analysis of the currently known research results carried out by other authors on the specified topic was carried out. The main attention is paid to the determining parameters of compressed concrete deformation diagram under the dynamic loads action: the known dynamic increase factor (DIF), the level of concrete ultimate deformability and the degree of elasticity modulus variability. The main advantages and disadvantages of the currently existing methods of determining these parameters are analyzed.

The main tasks of these studies are formulated. An analytically justified function of the maximum possible DIF values was obtained. It is shown that DIF directly depends on the well-known integral characteristic of concrete - the elastic-plasticity coefficient. The functional dependence of DIF on the compressed concrete strain rate under the different intensity dynamic loads action is proposed. An analytical relationship between the concrete elastic-plasticity coefficients under the action of dynamic and static loads has been established. A simple functional dependence of the compressed concrete deformability level on its class and the concrete strain rate was obtained. The expediency of using the initial modulus of concrete deformations (elasticity) in reinforced concrete elements and structures calculation methods is indicated.

Keywords: concrete, diagram, strain rate, dynamic increase factor, deformability, elastic-plasticity coefficient.

Вступ. Відомо, що в основу так званих «деформаційних» моделей бетону закладено повні діаграми його деформування, отримані з випробуваннями стандартних призмових або циліндричних зразків статичним навантаженням зі сталою швидкістю їх деформування $\dot{\varepsilon}$. Проводять такі діаграми деформування через опорні або характерні параметричні точки, визначені за певними (крайовими) граничними умовами. І тут важливо, щоб і вказані точки, і вищезазначені умови були універсальними та мали чіткий фізичний зміст [1]. Тоді зі зміною швидкості деформування бетону $\dot{\varepsilon}$ стандартна діаграма $\sigma_c - \varepsilon_c$ буде трансформуватися в розрахункову $\sigma_{c,d} - \varepsilon_{c,d}$ автоматично за уточненими характеристиками цих параметричних точок. Для бетонних і залізобетонних елементів і конструкцій, проєктованих на сприйняття динамічних навантажень і впливів будь-якої інтенсивності, подібна трансформація набуває особливого значення. Інакше кажучи, щоб побудувати трансформовану діаграму деформування стиснутого бетону $\sigma_{c,d} - \varepsilon_{c,d}$, необхідно мати інформацію про коефіцієнт динамічного зміцнення бетону (DIF), рівень його граничної (критичної) деформативності $\varepsilon_{c1,d} / \varepsilon_{c1}$ і ступінь змінності модуля пружності $E_{c,d} / E_c$. Також слід пам'ятати, що всі ці параметри залежать від швидкості деформування бетону.

Щодо коефіцієнта DIF , то всі відомі на сьогодні залежності з його визначення можна умовно поділити на три окремі групи, пов'язані з тривалістю дії динамічного навантаження τ [2], швидкістю зростання напружень $\dot{\sigma} = d\sigma / dt$ [3-5] або швидкістю деформування бетону $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt$ [3, 5-12]. Детальний аналіз зазначених залежностей і їхніх основних недоліків наведено в роботі [13], де вказано, що жодна з відомих на

сьогодні функцій DIF не враховує впливу на нього пружно-пластичних властивостей бетону. Водночас у більшості експериментальних досліджень [14-16] зазначено, що коефіцієнт DIF суттєво залежить від класу бетону.

Щодо рівня «граничної» деформативності стиснутого бетону за дії динамічних навантажень, то тут результати відповідних експериментальних досліджень є вкрай суперечливими. В одних роботах [6, 17, 18] вказано, що зі зростанням швидкості деформування бетону він зменшується, в інших же [19-21], навпаки, – зростає. Якщо в першому випадку можна знайти певне (логічне) обґрунтування такої поведінки бетону, то у другому його віднайти неможливо. Спільним же недоліком усіх вищезгаданих робіт, як і європейських стандартів [3, 5], є те, що рівень деформативності стиснутого бетону $\varepsilon_{c1,d} / \varepsilon_{c1}$ ніяк не пов'язаний зі ступенем його пружно-пластичності (класом).

Ступінь зростання модуля пружності бетону за дії динамічних навантажень також залежить від його класу [22-24]. Однак у сучасних методиках розрахунку співвідношення $E_{c,d} / E_c$ приймають сталим [25, 26] або залежним лише від швидкості деформування бетону $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt$ [4, 5, 27].

Тому цілком очевидно, що подальша розбудова універсальної моделі деформування бетону потребуватиме встановлення аналітичного зв'язку його визначальних характеристик не тільки зі швидкістю деформування бетону, але і ступенем його пружно-пластичності (класом).

Постановка мети і задач досліджень. Вишукування спрямовані на встановлення функціональної залежності визначальних параметрів діаграми деформування стиснутого бетону не тільки від швидкості його деформування, але і ступеня пластичності (класу) бетону. При цьому основну увагу зосереджено на коефіцієнті

динамічного зміцнення бетону і рівні його «граничної» деформативності.

Методика досліджень. Дослідження ґрунтуються на загальних закономірностях фізико-математичного моделювання процесів деформування стиснутого бетону за будь-якого режиму його завантаження [28-31] і загальновідомому законі збереження питомої потенціальної енергії деформування матеріалів [1, 32, 33].

Результати досліджень. Оскільки бетон належить до групи пружно-пластичних матеріалів, то визначальні параметри діаграми $\sigma_c - \varepsilon_c$ завжди будуть

обумовлені швидкістю деформування самого бетону $\dot{\varepsilon}$. Тому за дії «миттєвих» динамічних навантажень міцність на стиск, відповідні їй критичні деформації та модуль пружності бетону сягатимуть своїх граничних значень $f_{ck,du}$, $\varepsilon_{c1,du}$ та $E_{c,du}$.

Цілком очевидно, що характер зв'язку між вищезгаданими статичними та динамічними характеристиками стиснутого бетону (рис. 1) можна відстежити за допомогою закону збереження питомої потенціальної енергії деформування (руйнування) матеріалів [32, 33].

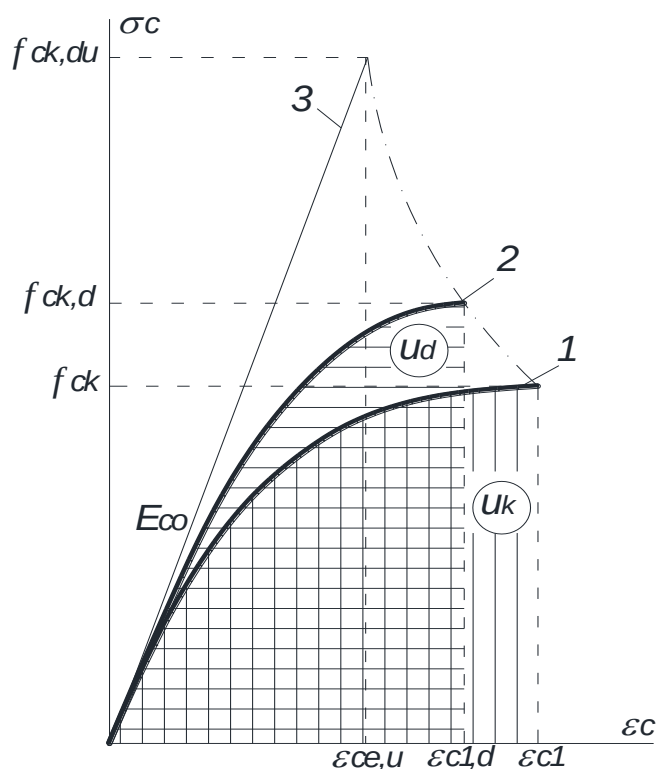


Рис. 1. Епюри питомої потенціальної енергії руйнування бетону за режимів завантаження: 1 – короточасного (статичного); 2 – динамічного; 3 – миттєвого динамічного

У роботах [1, 13] функціональний зв'язок між граничною міцністю стиснутого бетону за дії динамічного навантаження, близького до миттєвого ($\dot{\varepsilon}_m = 10^3 \text{ c}^{-1}$), і

його стандартною міцністю за дії статичного навантаження ($\dot{\varepsilon}_s = 10^{-6} \text{ c}^{-1}$) подано як

$$DIF_u = \frac{f_{ck,du}}{f_{ck}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{(k-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(k-1)^2}{(k-2)} - \left(\frac{k-1}{k-2} \right)^2 \ln(k-1) \right]}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт пружно-пластичності стиснутого бетону за дії статичних навантажень, $k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck}$.

Застосовуючи закон збереження питомої потенціальної енергії руйнування бетону в діапазоні швидкостей його деформування $10^{-6} c^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 10^3 c^{-1}$, отримуємо таке рівняння:

$$\frac{k \cdot f_{ck}^2}{(k-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(k-1)^2}{(k-2)} - \left(\frac{k-1}{k-2} \right)^2 \ln(k-1) \right] = \frac{k_d \cdot f_{ck,d}^2}{(k_d-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(k_d-1)^2}{(k_d-2)} - \left(\frac{k_d-1}{k_d-2} \right)^2 \ln(k_d-1) \right], \quad (2)$$

де k_d – коефіцієнт пружно-пластичності бетону за дії динамічних навантажень, $k_d = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1,d} / f_{ck,d}$.

Числовим розв'язком цього рівняння стала аналітична залежність коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону, функціонально пов'язана не тільки зі швидкістю деформування бетону, але і ступенем пластичності (класом) бетону (рис. 2)

$$DIF = \frac{f_{ck,d}}{f_{ck}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{(k-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(k-1)^2}{(k-2)} - \left(\frac{k-1}{k-2} \right)^2 \ln(k-1) \right]}^{((1+\log(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s)) / 9)^2} \quad \text{для } \dot{\varepsilon} \geq 10^{-6} c^{-1}, \quad (3)$$

де $\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформування стиснутого бетону за дії динамічних навантажень;

$\dot{\varepsilon}_s$ – максимальна швидкість деформування стиснутого бетону за дії статичних (квазістатичних) навантажень, $\dot{\varepsilon}_s = 10^{-5} c^{-1}$.

Також за допомогою методів числового аналізу встановлено функціональний взаємозв'язок між коефіцієнтами пружно-пластичності бетону за дії динамічних і статичних навантажень:

$$k_d = 1 + (k-1) \cdot (\log(\dot{\varepsilon}_m / \dot{\varepsilon}) / 9) + k / 5 \cdot (9 - \log(\dot{\varepsilon}_m / \dot{\varepsilon})) \cdot (\log(\dot{\varepsilon}_m / \dot{\varepsilon}) / 18)^2, \quad (4)$$

де $\dot{\varepsilon}_m$ – швидкість деформування стиснутого бетону за дії миттєвого динамічного навантаження, обмежена величиною $\dot{\varepsilon}_m = 10^3 c^{-1}$.

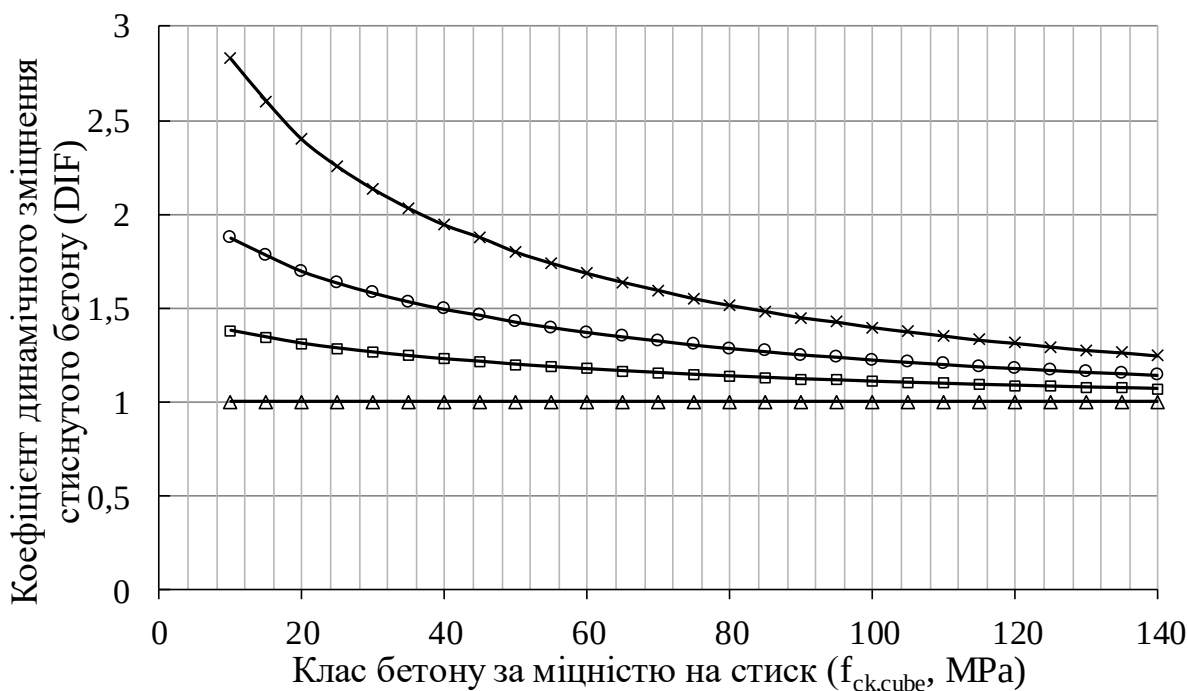


Рис. 2. Залежність коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону від його класу за швидкості деформування бетону:

Δ - $\dot{\varepsilon} = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$; □ - $\dot{\varepsilon} = 10^{-1} \text{ с}^{-1}$; ○ - $\dot{\varepsilon} = 10^1 \text{ с}^{-1}$; × - $\dot{\varepsilon} = 10^3 \text{ с}^{-1}$

Цим підтверджено, що ступінь пластичності бетону залежить не тільки від його класу, але і швидкості деформування бетону (рис. 3).

Коефіцієнти пружно-пластичності бетону за дії динамічних і статичних навантажень можна пов'язати між собою і за допомогою початкового модуля пружності

$$k_d = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1,d} / f_{ck,d} = k \cdot f_{ck} / \varepsilon_{c1} \cdot \varepsilon_{c1,d} / f_{ck,d}. \quad (5)$$

Тоді рівень деформативності стиснутого бетону за дії динамічних навантажень можна прогнозувати за допомогою такого виразу:

$$\varepsilon_{c1,d} / \varepsilon_{c1} = DIF \cdot k_d / k, \quad (6)$$

що відображує залежність рівня деформативності стиснутого бетону від його класу та швидкості деформування бетону (рис. 4).

Що стосується рівня зростання модуля пружності бетону $E_{c,d} / E_c$ за дії динамічних навантажень, то нема ніякої потреби в його відслідковуванні, оскільки в авторській методиці розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій [1] запропоновано використовувати модуль деформацій бетону, пов'язаний із його початковим значенням, тобто початковим модулем пружності бетону E_{co} .

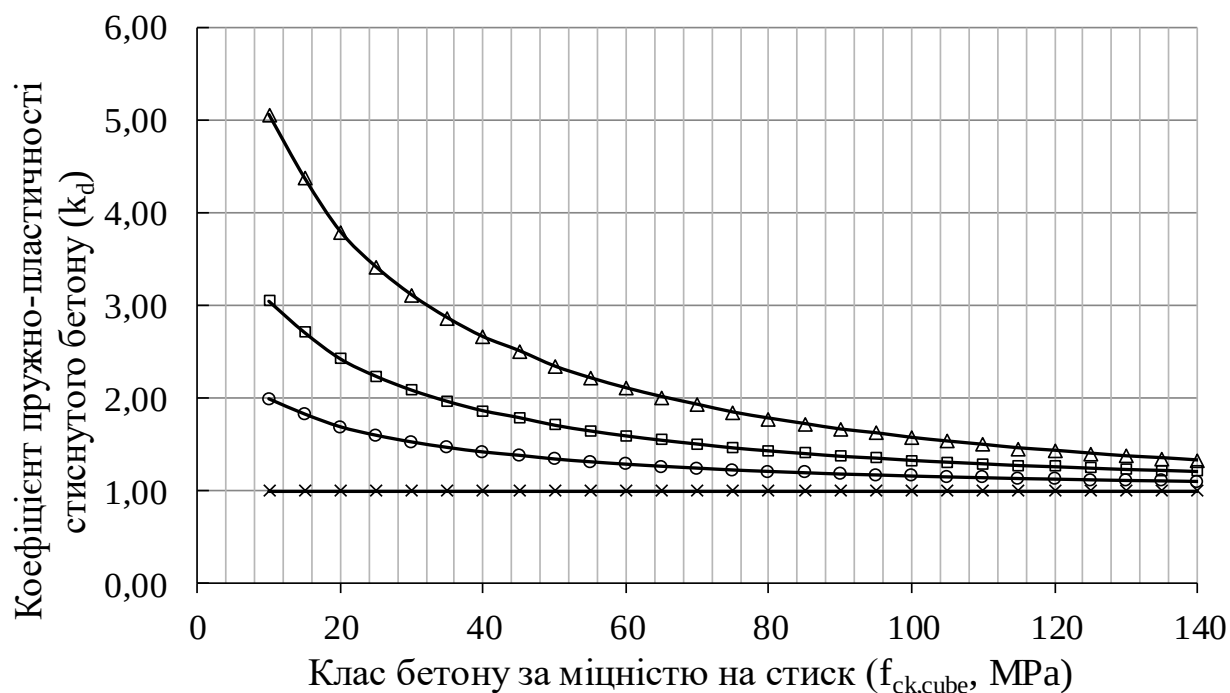


Рис. 3. Залежність коефіцієнта пружно-пластичності стиснутого бетону від його класу за швидкості деформування бетону:

Δ - $\dot{\varepsilon} = 10^{-6} \text{ c}^{-1}$; $\square$ - $\dot{\varepsilon} = 10^{-1} \text{ c}^{-1}$; $\circ$ - $\dot{\varepsilon} = 10^1 \text{ c}^{-1}$; $\times$ - $\dot{\varepsilon} = 10^3 \text{ c}^{-1}$

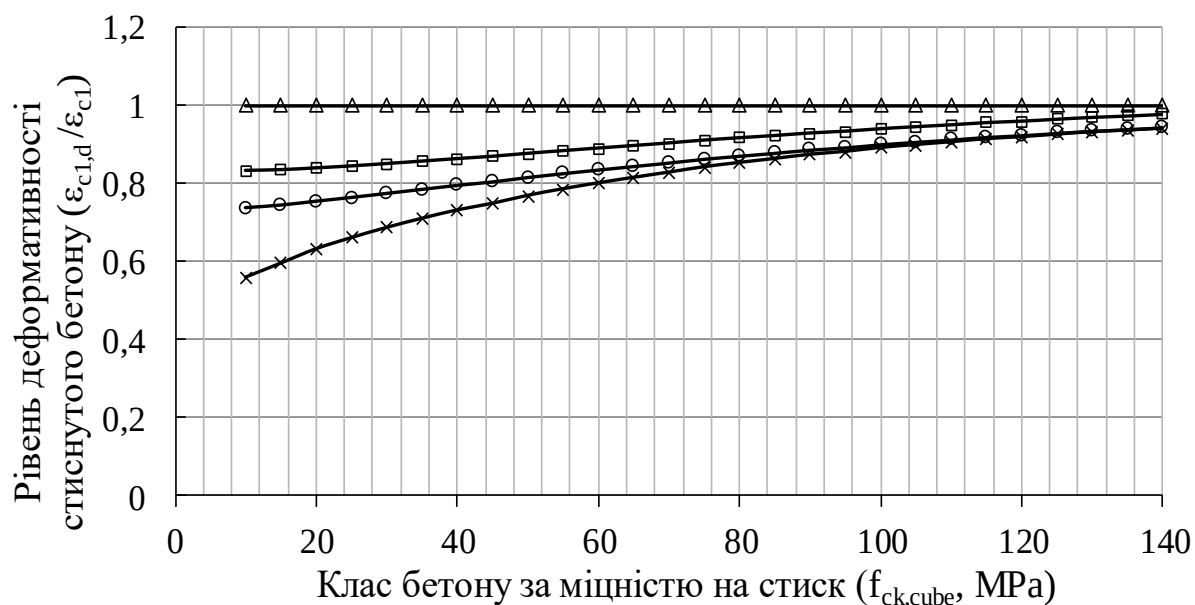


Рис. 4. Залежність рівня деформативності стиснутого бетону від його класу за швидкості деформування бетону:

Δ - $\dot{\varepsilon} = 10^{-6} \text{ c}^{-1}$; $\square$ - $\dot{\varepsilon} = 10^{-1} \text{ c}^{-1}$; $\circ$ - $\dot{\varepsilon} = 10^1 \text{ c}^{-1}$; $\times$ - $\dot{\varepsilon} = 10^3 \text{ c}^{-1}$

Ефективність розробленої методики визначення коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону оцінювали порівнянням результатів теоретичних розрахунків з експериментальними даними

окремих дослідників (рис. 5). Подібні порівняння проведені і з результатами розрахунків, виконаних за відомими методиками CEB FIB [3, 5].

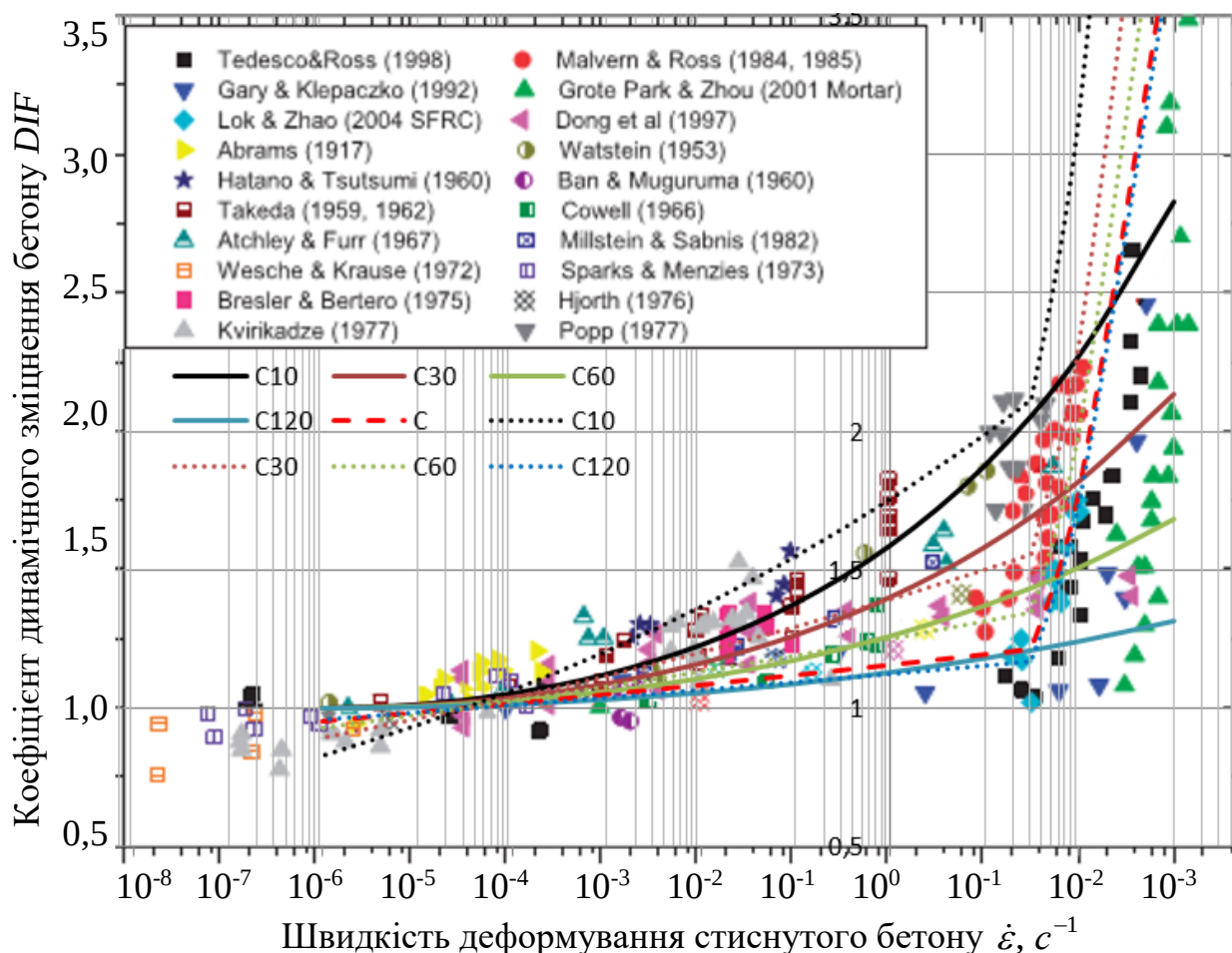


Рис. 5. Залежність коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону від швидкості деформування бетону для різних його класів:

- за функцією (3);
- - CEB-FIP MC 1990 [3];
- - - - - Fib MC 2010 [5]

Висновки. Завдяки отриманим аналітичним залежностям коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону DIF , рівня його деформативності $\varepsilon_{c1,d} / \varepsilon_{c1}$ і коефіцієнта пружно-пластичності k_d можна доволі просто прогнозувати не тільки

міцність $f_{ck,d}$ і критичні деформації $\varepsilon_{c1,d}$ стиснутого бетону за будь-якої швидкості його деформування, але й моделювати діаграму деформування стиснутого бетону в залізобетонних елементах і конструкціях за дії динамічних навантажень різної інтенсивності.

Загалом же результати досліджень відкривають доволі широкі можливості для розроблення універсальної методики

розрахунку бетонних і залізобетонних елементів і конструкцій за дії навантажень будь-якої інтенсивності та тривалості.

Список використаних джерел

1. Romashko V., Romashko-Maistruk O. Strength resource calculation of the reinforced concrete elements according to the energy criterion. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 269-276. (SCOPUS).
2. Grigoriev A. S., Shilko E. V., Skripnyak V. A., Chernyavsky A. G., Psakhie S. G. The numerical model of dynamic mechanical behavior of brittle materials based on the concept of the kinetic theory of strength. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017. No. 3. P. 75-99.
3. CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. Lausanne: Comité Euro-International du Béton, 1991. 437 p.
4. Fujikake K., Mizuno J., Suzuki A., Ohno T., Nonak T. Dynamic strain softening of concrete in compression under rapid loading. *WIT Transactions on the Built Environment: Structures under Shock & Impact*. 1998. Vol. 32. P. 481-491.
5. Fib Model Code 2010. Final draft. Fib Bulletin 66. 2012. Vol. 2. 377 p.
6. Dilger W. H., Koch R. and Kowalczyk R. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates. *ACI Journal*. 1984. Vol. 81, No. 1. P. 73-81. (SCOPUS).
7. Malvern L. E., Jenkins D. A., Tang T., Ross C. A. Dynamic compressive testing of concrete. *Proceedings of the Second Symposium on The Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures*, 15-18 April 1985. Panama City Beach, Florida, 1985. P. 194-199.
8. Tedesco J. W., Ross C. A. Strain-rate-dependent constitutive equations for concrete. *ASME J. Press. Vessel Technol.* 1998. Vol. 120. P. 398-405.
9. Grote D. L., Park S. W., Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain-rates and pressures: I. Experimental characterization. *International Journal of Impact Engineering*. 2001. Vol. 25. P. 869-886.
10. Long K. S., Kasmuri M., Hasan A. S. Z., Hamid R. Dynamic Increase Factor of High Strength Concrete with Silica Fume at High Strain Rate Loading. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 857. P. 299-304. (SCOPUS).
11. Lee S., Kim K.-M., Cho J.-Y. Investigation into Pure Rate Effect on Dynamic Increase Factor for Concrete Compressive Strength. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 210. P. 11-17.
12. Sun B., Chen R., Ping Y., Zhu Z., Wu N., Shi Z. Research on Dynamic Strength and Inertia Effect of Concrete Materials Based on Large-Diameter Split Hopkinson Pressure Bar Test. *Materials*. 2022. Vol. 15. 2995.
13. Ромашко-Майструк О. В., Ромашко В. М. Основні особливості деформування бетону за дії динамічних навантажень. *Збірник наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2023. Вип. 205. С. 60-70.
14. Cowell W. L. Dynamic properties of plain Portland cement concrete. Technical Report No. R447, DASA 130181. US Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, 1966. 51 p.
15. Kono S., Watanabe F., Kajitani A. Stress-strain relation of confined concrete under dynamic loading. In *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, de Borst et al. (Ed.). Swets & Zeitlinger, Lisse, Netherlands, 2001. P. 585-592.
16. Othman H., Marzouk H. Strain Rate Sensitivity of Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*. 2016. Vol. 113, No. 2. P. 143-150. (SCOPUS).
17. Hjorth O. Ein Beitrag zur Frage der Festigkeiten und des Verbundverhaltens von Stahl und Beton bei hohen Dehnungsgeschwindigkeiten. Dissertation TU Braunschweig, 1976. 317 p.

18. Hughes B. P., Watson A. J. Compressive strength and ultimate strain of concrete under impact loading. *Mag. Contr. Res.* 1978. Vol. 30(105). P. 189-199.
19. Watstein D. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete. *ACI Journal*. 1953. Vol. 49. P. 729-744. (SCOPUS).
20. Bresler B., Bertero V.V. Influence of high strain rate and cyclic loading of unconfined and confined concrete in compression: in Proceedings of 2nd Canadian Conference on Earthquake Engineering, Hamilton, Ontario, 1975. P. 1-13.
21. Rostasy F. S., Scheuermann J. and Sprenger K. H. Mechanical behaviour of some construction materials subjected to rapid loading and low temperature, *Betonwerk+Fertigteil-Technik*. 1984. Vol. 50(6). P. 393-401.
22. Bischoff P. and Perry S. Compressive Behaviour of Concrete at High Strain Rates. *Materials and Structures*. 1991. Vol. 24, No. 6. P. 425-450.
23. Salman M., Al-Amawee A. The Ratio between Static and Dynamic Modulus of Elasticity in Normal and High Strength Concrete. *Journal of Engineering and Development*. 2006. Vol. 10, No. 2. P. 163-174.
24. Popovics J. A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete. Final Report. American Concrete Institute - Concrete Research Council, Urbana, IL., 2008. 16 p.
25. Lydon F. D., Balendran R.V. Some Observations on Elastic Properties of Plain Concrete. *Cement and Concrete Research*. 1986. Vol. 16, No. 3. P. 314-324.
26. Lu X., Sun Q., Feng W., Tian J. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. P. 231-239.
27. Peng S., Yu Z., Zhao Q., Du X., Xie X., Chen B., Zhang Y. Research on Dynamic Compressive Performance and Failure Mechanism Analysis of Concrete after High Temperature and Rapid Cooling. *Materials*. 2022. Vol. 15. 4642.
28. Ромашко В. Н. Обобщенная модель деформирования железобетонных элементов и конструкций. *Міжнародний науковий журнал (International scientific journal)*. 2016. Вип. 3. С. 84-86.
29. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Львів, 2018. 533 с.
30. Romashko O. V., Romashko V. M. Model of multilevel formation of normal cracks in reinforced concrete elements and structures. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 708. 012069.
31. Romashko V. and Romashko O. Fundamentals of the General Theory of Resistance of Reinforced Concrete Elements and Structures to Power Influences. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 534-540.
32. Romashko V. M. and Romashko O. V. Energy resource of reinforced concrete elements and structures for the deformation-force model of their deformation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 708. 012068.
33. Ромашко В. М., Ромашко-Майструк О. В. Модель та методика розрахунку ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій. *Вісник ОДАБА: зб. наук. праць*. 2021. Вип. 84. С. 59-68.

Ромашко-Майструк Олена Василівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko-Maistruk Olena Vasylivna, PhD(Tech.), associate professor at the Department of Industrial, Civil Construction and Engineering Structures, National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Статтю прийнято 12.03.2025 р.

УДК 624.042:624.046:624.072

ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВНУТРІШНІХ ЗУСИЛЬ У ПЕРЕРІЗАХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Інженер-програміст А. В. Томашевський

NUMERICAL-ANALYTICAL TECHNIQUE FOR DETERMINING INTERNAL FORCES IN CROSS-SECTIONS OF BUILDING STRUCTURES

Software engineer A. V. Tomashevskiy

Анотація. У статті розглянуто чисельно-аналітичну методику визначення внутрішніх зусиль у перерізах будівельних конструкцій, модельованих сукупністю скінченних елементів. Робота таких конструкцій може бути подібною до роботи стрижнів, або їхній напружено-деформований стан можна оцінити через стрижневі зусилля в їхніх перерізах. Для обчислення внутрішніх зусиль у перерізах, складених із декількох вузлів моделі та скінченних елементів, що примикають, застосовують вузлові реакції — зусилля, що виникають у вузлах від дії елементів. Вузлові реакції підсумовують з вибраних скінченних елементів і вузлів по площі складеного перерізу та приводять до необхідної системи координат. Одержані внутрішні зусилля можна використовувати як самостійні дані для аналізу, так і вихідні дані для розрахунків конструювання: оцінювання несучої здатності та експлуатаційної придатності конструкцій, підбору армування, характеристик перерізів тощо. Наведено приклади реалізації запропонованої методики в системах ПК ЛІРА-САПР — «Кам'яні та армокам'яні конструкції» і «Стрижневі аналоги», результати розрахунку верифікаційних задач, продемонстровано приклади практичного застосування запропонованої методики в розрахункових скінченно-елементних моделях.

Ключові слова: метод скінченних елементів, внутрішні зусилля, вузлові реакції, моделювання конструкцій, стрижневі аналоги, напружено-деформований стан, чисельні методи.

Abstract. This paper presents a numerical-analytical technique for determining internal forces in cross-sections of building structures that are modeled using finite element methods (FEM). The study focuses on structural components that, despite being represented by a set of finite elements of different dimensions (beam, plate, and volumetric elements), exhibit behavior similar to bar-like structures: pilons, short piers, lintels, deep beams, prefabricated floor slabs, wall panels, diaphragms, core walls.

The methodology is based on summing nodal reactions from selected finite elements over a defined cross-section and transforming these forces into a chosen coordinate system. The proposed approach allows for determining internal forces in sections composed of multiple nodes and adjacent finite elements, ensuring consistency with engineering analysis and design principles. The results obtained through this approach can be used as standalone data for evaluating structural behavior or as input for further design calculations, including load-bearing capacity assessments, serviceability limit state verification, reinforcement calculation, and cross-section parameter determination.

The implementation of this method in the LIRA-SAPR software system is discussed in detail. It is integrated into two subsystems: "Stone and Reinforced Masonry Structures" and "Bar Analogues".

To validate the accuracy and applicability of the method, several verification problems are presented. These include structural models analyzed using beam elements, shell elements, and solid finite elements, with the computed internal forces being compared against theoretical values derived from classical mechanics of materials. The study demonstrates that the numerical-analytical approach produces results that are highly consistent with traditional beam theory calculations, confirming its validity for practical engineering applications.

One of the key advantages of this approach is its ability to keep the structural integrity of the original finite element model while allowing engineers to obtain results in a format that aligns with standard design practices. Unlike traditional stress integration methods, which can be affected by local stress concentrations and numerical inaccuracies, the use of nodal reactions provides a more robust and reliable means of extracting internal forces from FEM models. Despite its advantages, the method requires careful selection of finite elements and nodal regions to ensure accurate force summation. The automation of this process within the LIRA-SAPR software significantly simplifies the task, providing engineers with an efficient tool for evaluating internal forces in complex structures.

In conclusion, this numerical-analytical technique offers a powerful tool for engineers and researchers involved in structural analysis using finite element methods. Its integration into commercial structural engineering software ensures practical usability and efficiency, making it an essential advancement for modern engineering practice.

Key words: finite element method, internal forces, nodal force reactions, modeling of structures, bar analogues, stress-strain state, numerical methods.

Постановка проблеми. Для моделювання роботи будівельних конструкцій методом скінченних елементів використовують скінченні елементи різної розмірності: стрижневі, пластинні та об'ємні. Певний тип скінченного елемента вибирають на основі різних міркувань: по-перше, слід забезпечити достатній рівень відповідності між математичною моделлю й дійсною роботою модельованої конструкції в заданих умовах; по-друге, вибирають на користь скінченних елементів, прийнятних для формування коректного вузла примикання до інших елементів і зручних для збирання навантажень і аналізу результатів; по-третє, сучасні інтегровані програмні комплекси будівельного призначення також використовують внутрішні зусилля в скінченних елементах, обчислені в результаті скінченно-елементного аналізу, для виконання інших прикладних розрахунків: розрахунків за міцністю, стійкістю, і конструктивних розрахунків залізобетонних, сталевих і армокам'яних конструкцій.

Існують будівельні конструкції, модельовані через зазначені вище причини набором скінченних елементів різної розмірності, проте за характером своєї роботи в певних умовах подібні до стрижнів. До таких конструкцій належать, наприклад, пілони, короткі простінки, перемички, балки-стілки, збірні плити перекриттів, стінові панелі, діафрагми, ядра жорсткості будівель і т. п. Поперечні перерізи цих конструкцій будуть подані в розрахункових моделях як сукупність скінченних елементів і вузлів. Називатимемо такі поперечні перерізи складеними. Для докладного аналізу цих конструкцій корисно (а для деяких прикладних розрахунків необхідно) визначити внутрішні зусилля в їхніх складених поперечних перерізах аналогічно зусиллям у поперечних перерізах стрижнів. У статті запропоновано чисельно-аналітичну методику визначення внутрішніх зусиль у перерізах конструкцій, модельованих сукупністю скінченних елементів, впроваджену в ПК ЛІРА-САПР [1].

Сутність методики. Основа пропонованої методики визначення внутрішніх зусиль полягає у використанні вузлових реакцій скінченних елементів для одержання інтегрованих зусиль із декількох скінченних елементів, що утворюють складений переріз будівельної конструкції. Такі скінченні елементи мають знаходитися по один бік від площини складеного перерізу та примикати до неї одним або кількома вузлами.

Під вузовими реакціями (вузовими зусиллями) скінченного елемента розуміють результуючу силу та результуючий момент, прикладені у вузлі елемента, що являють собою вплив певного елемента на конкретний вузол моделі. Вектор вузових

реакцій i -го скінченного елемента обчислюють за формулою

$$\{R_i\} = K_i \cdot \{U_i\}, \quad (1)$$

де K_i — матриця жорсткості i -го скінченного елемента;

U_i — вектор переміщень вузлів, що належать до i -го скінченного елемента.

Для визначення інтегрованих внутрішніх зусиль у складеному перерізі, утвореному n вихідними вузлами та m елементами, слід обчислити сумарні вузові реакції R_c та M_c , що виникають у цих вузлах від таких елементів, приведені до вибраної системи координат складеного перерізу (рис. 1).

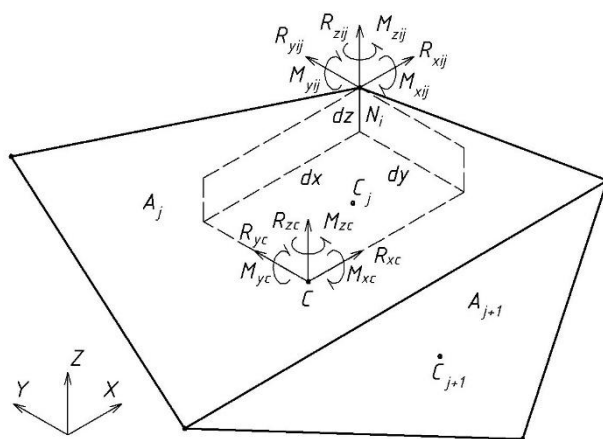


Рис. 1. Обчислення внутрішніх зусиль у складеному перерізі

Початком системи координат C складеного перерізу може бути будь-яка точка в площині перерізу, осі X та Y будуть розташовані в площині перерізу, а вісь Z — по нормалі до площини. Система координат може бути вибрана відповідно до потреб розрахунку. На практиці початок системи координат доцільно за замовчуванням розташовувати в геометричному центрі складеного перерізу, а напрями осей будуть залежати від особливостей програмної реалізації.

Геометричний центр складеного перерізу можна наближено визначити на основі площ примикання A_j з центрами тяжіння $(x_j; y_j; z_j)$ вихідних скінченних елементів до площини складеного перерізу: для стрижня площу його примикання розраховують на основі площі перерізу, для пластини — на основі товщини пластини та відстані між вузлами, для об'ємного СЕ — як площа грані, що прилягає до площини складеного перерізу.

$$x_c = \frac{\sum_{j=1}^m (A_j x_j)}{\sum_{j=1}^m A_j}; \quad y_c = \frac{\sum_{j=1}^m (A_j y_j)}{\sum_{j=1}^m A_j}; \quad z_c = \frac{\sum_{j=1}^m (A_j z_j)}{\sum_{j=1}^m A_j}. \quad (2)$$

Вузлові реакції від вихідних елементів — R_{ij} та M_{ij} — у складеному перерізі підсумовують з урахуванням плеча d між

точкою вузла N_i і початком системи координат перерізу C .

$$d_x = x_i - x_c; \quad d_y = y_i - y_c; \quad d_z = z_i - z_c; \quad (3)$$

$$R_{xc} = \sum_{i=1}^n R_{xij}; \quad R_{yc} = \sum_{i=1}^n R_{yij}; \quad R_{zc} = \sum_{i=1}^n R_{zij}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_{xc} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (M_{xij} - R_{yij} d_z + R_{zij} d_y); \\ M_{yc} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (M_{yij} - R_{zij} d_x + R_{xij} d_z); \\ M_{zc} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (M_{zij} - R_{xij} d_y + R_{yij} d_x). \end{aligned} \quad (5)$$

Відповідно до правила знаків і положення вихідних скінченних елементів (уздовж або проти нормалі до площини перерізу) сумарні вузлові реакції слід залишити з тим самим знаком або змінити його на протилежний. Для повороту вузлових реакцій у напрямках осей вибраної системи координат можна застосувати матрицю перетворення до результуючої сили реакції та результуючого моменту реакції.

Реалізація методики в ПК ЛПРА-САПР. Запропонована методика визначення внутрішніх зусиль реалізована в ПК ЛПРА-САПР у роботі двох її систем: «Кам'яні та армокам'яні конструкції» і «Стрижневі аналоги».

Для системи «Кам'яні та армокам'яні конструкції» розраховано внутрішні зусилля в поперечних перерізах простінків.

Ці складені перерізи формуються у горизонтальній площині на заданих користувачем рівнях для конструкцій стін, змодельованих пластинами. Внутрішні зусилля, обчислювані в глобальній системі координат, являють собою як самостійні дані для аналізу, так і вихідні дані для подальших автоматизованих розрахунків кам'яних і армокам'яних конструкцій.

Більш універсальні можливості для аналізу та конструювання різних будівельних конструкцій, робота яких подібна до роботи стрижнів, надає система «Стрижневі аналоги» [2].

Стрижневий аналог (рис. 2) — це група скінченних елементів і їхніх вузлів, логічно пов'язаних певним правилом, що визначає особливий алгоритм обчислення внутрішніх зусиль у певному стрижневому скінченному елементі. Цей стрижневий

скінченний елемент називають цільовим стрижнем.

Для визначення зусиль у розрахункових перерізах цільового стрижня задано набори вузлів та елементів, що утворюють плоскі складені перерізи аналізованої конструкції. Такі вузли та елементи називають вихідними об'єктами стрижневого аналога.

Внутрішні зусилля в розрахункових перерізах цільового стрижня обчислюють не на основі переміщень його вузлів, а підсумовуванням вузлових реакцій від наборів вибраних скінченних елементів. Передбачають, що кожен такий набір скінченних елементів формує складений поперечний переріз аналізованої конструкції, а вузли, реакції в яких підсумовують, лежать у площині цього

перерізу. Такі вузли та елементи називатимемо вихідними об'єктами стрижневого аналога.

До набору вихідних об'єктів, що утворює складений переріз, включають вузли, які лежать у площині цього перерізу, і скінченні елементи, які примикають до площини перерізу вузлами: одновузлові СЕ — безпосередньо, стрижні — одним вузлом, пластини — одним вузлом або двома вузлами на ребрі, об'ємні СЕ — одним вузлом, двома вузлами на ребрі або кількома вузлами на одній грані. Вихідними скінченними елементами стрижневого аналога можуть бути стрижневі, пластинні, об'ємні скінченні елементи, спецементи, а також комбінації з них. При цьому вихідні елементи і вузли можуть бути такими для кількох стрижневих аналогів.

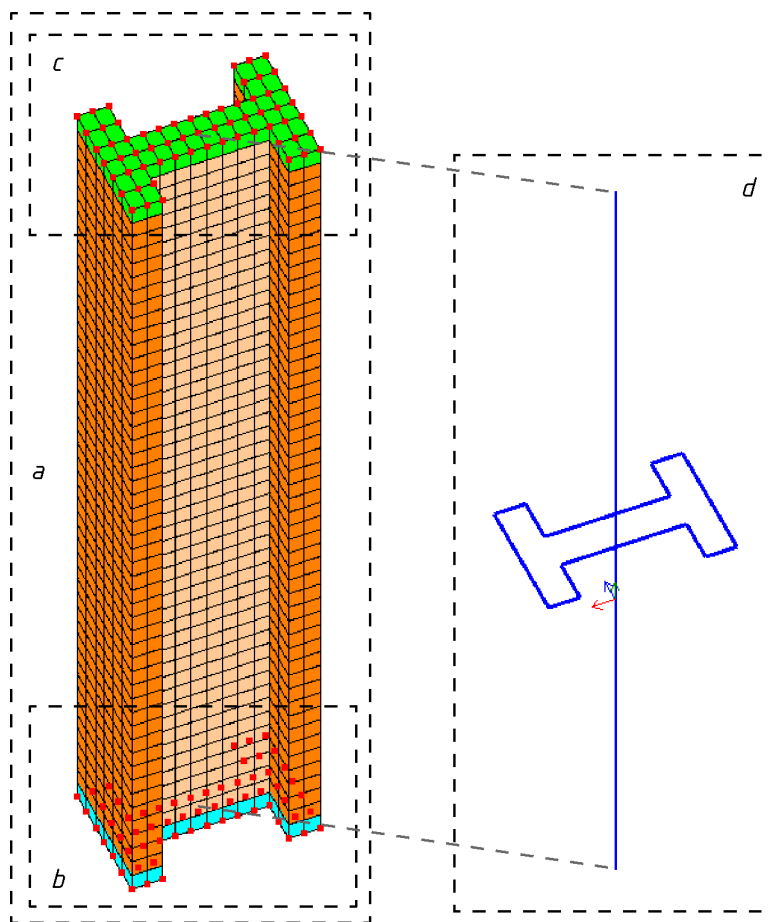


Рис. 2. Стрижневий аналог: а – вихідні об'єкти моделі; б – вузли та елементи початкового перерізу; с – вузли та елементи кінцевого перерізу; d – цільовий стрижень

Цільовий стрижень має два розрахункові перерізи — на початку та наприкінці. Якщо для аналізу складеної конструкції потрібна більша кількість розрахункових перерізів по її довжині, то необхідно створити ланцюжок із кількох стрижневих аналогів. Цільовий стрижень має знаходитися в певному положенні відносно аналізованої складеної конструкції: площини його початкового та скінченного розрахункових перерізів мають збігатися з відповідними площинами вихідних складених перерізів конструкції. Цільовий стрижень може бути двовузловим скінченим елементом будь-якого типу, крім спеціальних, що дає змогу розв'язувати задачі з різними ознаками схеми в плоскій і просторовій постановці. За замовчуванням під час створення стрижневого аналога застосовано тип СЕ 10 — універсальний просторовий стрижневий СЕ.

Вузлові реакції у вихідних вузлах від вихідних елементів стрижневого аналога підсумовують у кожному складеному перерізі відносно його геометричного центра та приводять до місцевої системи координат розрахункового перерізу цільового стрижня.

Розрахунок стрижневих аналогів відбувається за повного розрахунку моделі на його фінальному етапі. Результатом розрахунку стрижневих аналогів є внутрішні зусилля в розрахункових перерізах цільових стрижнів, обчислені окремо за всіма завантаженнями. Ці внутрішні зусилля слід сприймати як додаткове дискретне стрижнєве подання силових факторів, що виникають у вихідних складених перерізах, а не власні зусилля у цільових стрижнях. З цієї дискретності випливає, що отримані внутрішні зусилля не слід інтерполювати за довжиною цільового стрижня, вони справедливі лише в точках його початкового і кінцевого розрахункових перерізів. Це слід урахувати під час перегляду результатів розрахунку у вигляді епюр чи використовувати графічне подання

зусиль у вигляді мозаїк та / або в табличному вигляді.

Обчислені внутрішні зусилля в перерізах цільового стрижня далі використовують для визначення зусиль за розрахунковими сполученнями навантажень і зусиль, а також у роботі систем конструювання. Цільові стрижні при цьому нічим не відрізняються від інших скінчених елементів з точки зору постпроцесорів: зокрема, для них можна використовувати поєднання в конструктивні елементи, задавання правил уніфікації тощо.

Стрижневі аналоги в ПК ЛІРА-САПР можна застосовувати для визначення внутрішніх зусиль:

- у лінійних статичних і динамічних розрахунках, зокрема методом прямого нелінійного інтегрування (динаміка в часі) [3];
- нелінійних розрахунках на останній стадії прикладання навантаження (повне навантаження) [3];
- розрахунках за методиками інженерної нелінійності [4, 5];
- нелінійних розрахунках із змінною розрахунковою схемою (моделювання процесів монтажу та демонтажу) за умови, що всі вихідні елементи стрижневого аналога мають однакові стадії монтажу та демонтажу (цільові стрижні рекомендовано не включати в процес зміни розрахункової схеми або включати в ті самі стадії монтажу та демонтажу, що й вихідні об'єкти відповідних стрижневих аналогів) [6, 7].

Важливим аспектом застосування цього інструменту для масового проєктування є можливість автоматизованої генерації стрижневих аналогів: для цього аналізують вихідні вузли та скінченні елементи конструкції, визначають їхню належність до площин початкового та кінцевого перерізів стрижневих аналогів, генерують цільові стрижні стрижневих аналогів у відповідних положеннях та, за можливості, автоматизовано призначають поперечні перерізи відповідних форм і розмірів для цільових стрижнів.

Верифікаційні задачі. Розглянемо приклади верифікаційних задач, які можуть проілюструвати роботу наведеної методики обчислення внутрішніх зусиль у ПК ЛІРА-САПР.

Задача 1. Дано вертикальний консольний стрижень квадратного поперечного перерізу, навантажений поздовжнім і поперечними зосередженими навантаженнями на вільному кінці (рис. 3).

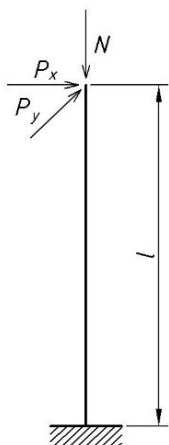


Рис. 3. Розрахункова схема до задачі 1

Модуль пружності $E = 3.0 \cdot 10^7$ Па; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0.2$; висота стрижня $l = 10$ м; розміри поперечного перерізу $b = h = 0.5$ м; зосереджена сила, що діє вздовж осі X, $P_x = 10$ кН; зосереджена сила, що діє вздовж осі Y, $P_y = 10$ кН; зосереджена

сила, що діє вздовж осі Z, $N = 10000$ кН. Необхідно визначити внутрішні зусилля в опорному поперечному перерізі стрижня.

Розв'язання задачі наведено в роботі [8]. За недеформованих схем поздовжня сила від вертикального навантаження, а також поперечні сили та згинальні моменти від горизонтальних навантажень обчислюють за формулами

$$N(0) = N;$$

$$Q_x(0) = P_x; \quad Q_y(0) = P_y; \quad (6)$$

$$M_x(0) = P_y l; \quad M_y(0) = P_x l.$$

Розраховуючи в ПК ЛІРА-САПР, розглядають три розрахункові моделі, виконані зі скінченних елементів різних типів: стрижневих СЕ 10 (універсальний просторовий стрижневий СЕ); оболонкових СЕ 48 (універсальний чотирикутний СЕ оболонки з проміжними вузлами на сторонах); об'ємних СЕ 35 (універсальний просторовий восьмивузловий ізопараметричний СЕ з проміжними вузлами на сторонах). У моделях із оболонкових СЕ використано сітку 4×10 СЕ, а з об'ємних — сітку $4 \times 4 \times 10$ СЕ; також створено стрижневі аналоги для визначення зусиль.

Результати розрахунку подано в табл. 1. Зусилля в цільових стрижнях стрижневих аналогів відповідають зусиллям, обчисленим за моделлю зі стрижневих СЕ 10.

Таблиця 1

Результати розрахунку задачі 1

Шукана величина	Рішення для стрижня	Рішення з використанням стрижневих аналогів	
Поздовжня сила $N(0)$, кН	10000.00	СЕ 48	10000.00
		СЕ 35	10000.00
Поперечні сили $Q_x(0)$, $Q_y(0)$, кН	10.00	СЕ 48	10.00
		СЕ 35	10.00
Згинальні моменти $M_x(0)$, $M_y(0)$, кН·м	100.00	СЕ 48	100.00
		СЕ 35	100.00

Задача 2. Дано затиснену по кінцях балку, завантажену рівномірно розподіленим навантаженням q (рис. 4). Модуль пружності $E = 3.0 \cdot 10^7$ Па; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0.2$; довжина балки

$l = 2.4$ м; ширина поперечного перерізу $b = 0.2$ м; висота поперечного перерізу $h = 0.3$ м; навантаження $q = 10$ кН/м. Необхідно визначити внутрішні зусилля у характерних точках балки.

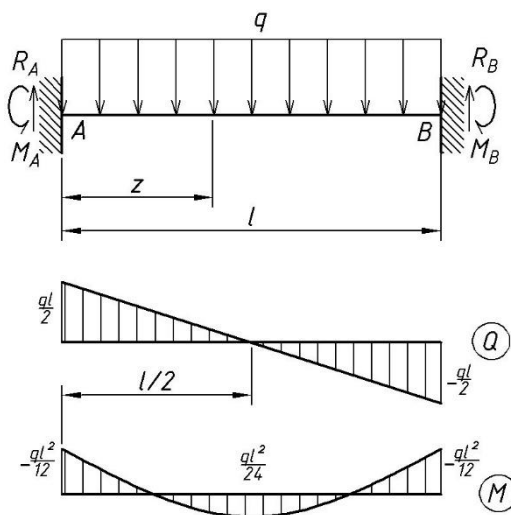


Рис. 4. Розрахункова схема до задачі 2

Розв'язання задачі подано в роботі [8]. Опорні реакції R_A , R_B , M_A , M_B , поперечна сила Q , згинальний момент M , внутрішні

зусилля в характерних перерізах обчислюють за формулами

$$R_A = R_B = \frac{ql}{2}; \quad M_A = M_B = \frac{ql^2}{12};$$

$$0 \leq z \leq l:$$

$$Q(z) = \frac{ql}{2} \left(1 - 2\frac{z}{l}\right); \quad Q(0) = \frac{ql}{2}; \quad Q(l) = -\frac{ql}{2};$$

$$M(z) = \frac{ql^2}{2} \left(\frac{z}{l} - \frac{z^2}{l^2} - \frac{1}{6}\right); \quad M(0) = M(l) = -\frac{ql^2}{12}; \quad M(l/2) = \frac{ql^2}{24}.$$
(7)

Розраховуючи в ПК ЛІРА-САПР, розглядають кілька розрахункових моделей, виконаних зі скінченних елементів різних типів: стрижневих СЕ 10 (універсальний просторовий стрижневий СЕ), пластинних СЕ 21 (прямокутні СЕ плоскої задачі (балка-стінка)) і пластинних СЕ 28 (прямокутні СЕ

плоскої задачі (балка-стінка) з проміжними вузлами на сторонах). У моделях із пластинних СЕ використано сітку 16×6 СЕ, також створено стрижневі аналоги для визначення зусиль.

Результати розрахунку подано в табл. 2. Зусилля в цільових стрижнях

стрижневих аналогів достатньою мірою відповідають зусиллям, обчисленим за

відповідними моделями зі стрижневих СЕ 10.

Таблиця 2

Результати розрахунку задачі 2

Шукана величина	Рішення для стрижня	Рішення з використанням стрижневих аналогів	
Поперечна сила на опорі А, кН	12.00	СЕ 21	12.00
		СЕ 28	12.00
Згинальний момент на опорі А, кН·м	-4.80	СЕ 21	-4.77
		СЕ 28	-4.79
Згинальний момент у середній точці прогону, кН·м	2.40	СЕ 21	2.43
		СЕ 28	2.41

Приклади застосування методики за допомогою ПК ЛІРА-САПР. Для моделювання конструкцій багатопверхових монолітних залізобетонних будівель для аналізу внутрішніх зусиль у пілонах, балках-стінках, областях стін над і під прорізами, ребрах плит чи контурних балках, що працюють сумісно з плитою, можуть бути застосовані стрижневі аналоги. Такі конструкції моделюють переважно пластинними скінченними елементами, що

дає змогу адекватно передати їхню жорсткість у складі всієї будівлі, а також забезпечити коректні стики примикання конструкцій одна до одної. Стрижневі аналоги таких конструкцій дають змогу зберегти переваги їх моделювання пластинами і одержати додаткове подання цих конструкцій у вигляді стрижнів зі подальшим визначенням внутрішніх зусиль у формі, зручній для прикладних розрахунків на міцність та експлуатаційну придатність (рис. 5).

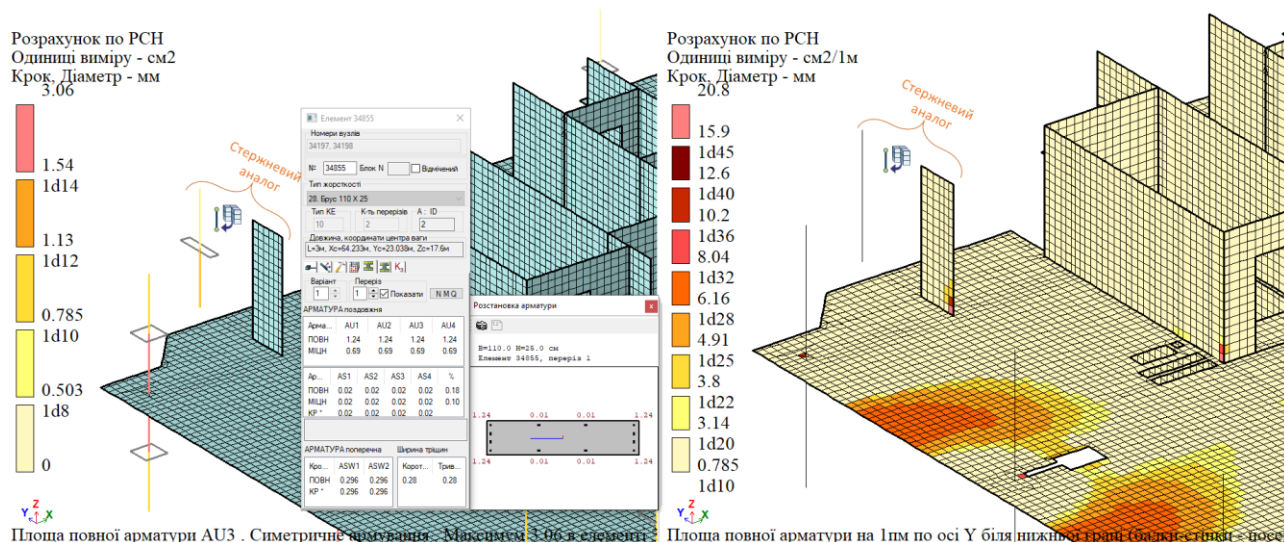


Рис. 5. Результати підбору армування в пілоні, змодельованому за допомогою пластинних СЕ і стрижневого аналога

З метою виконання чисельних досліджень інколи існує необхідність у побудові детальних скінченно-елементних моделей будівельних конструкцій і їхніх вузлів: наприклад, сталева балка в складі рами, змодельована пластинними скінченними елементами для дослідження ефектів локальної втрати стійкості (рис. 6), а також залізобетонна балка, тіло бетону якої

змодельовано об'ємними, а армування — стрижневими скінченними елементами, з метою дослідження нелінійних ефектів під навантаженням (рис. 7) [9]. У цих моделях стрижневі аналоги виконують роль допоміжного інструменту для аналізу, що дає змогу отримати з вихідних скінченних елементів зусилля в перерізах конструкцій як для класичних стрижневих елементів.

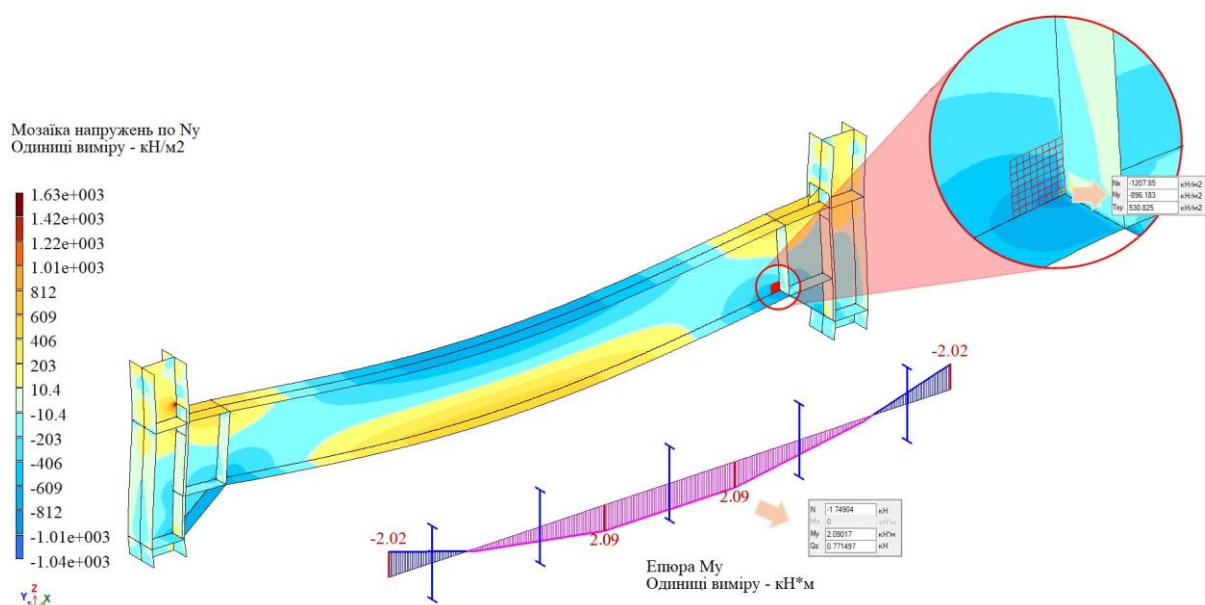


Рис. 6. Нормальні напруження та згинальні моменти в сталевій балці, змодельованій пластинними СЕ і стрижневими аналогами

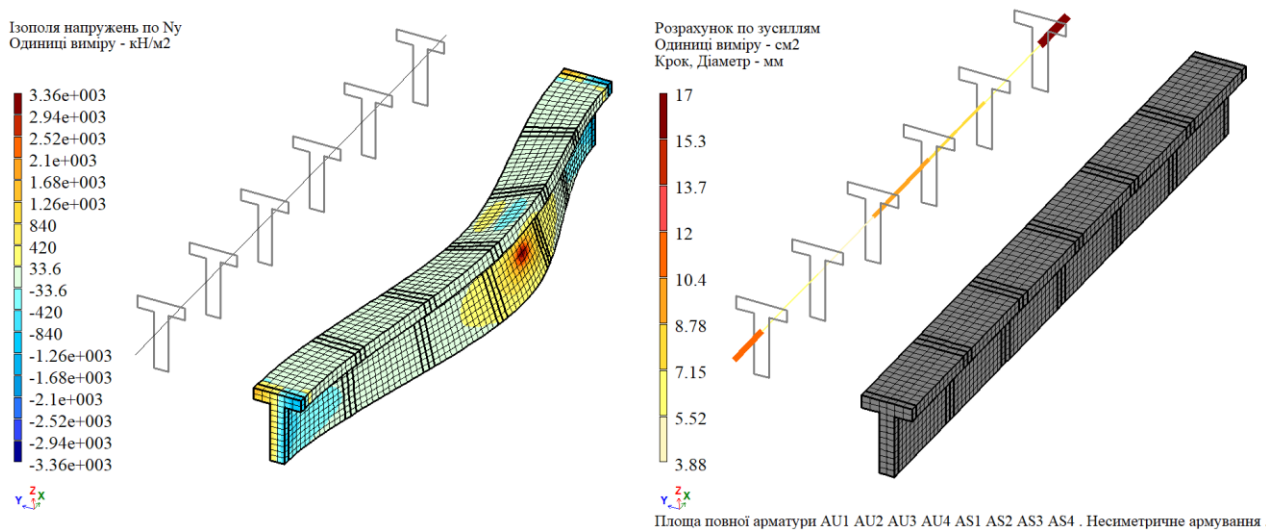


Рис. 7. Нормальні напруження та згинальні моменти в залізобетонній балці, змодельованій об'ємними СЕ і стрижневими аналогами

Існують масивні кам'яні, бетонні та залізобетонні конструкції, які зазвичай моделюють з об'ємних скінченних елементів, але для прикладних розрахунків і конструювання необхідно отримати зусилля

в певних перерізах у подібному до стрижнів вигляді. Так, у моделі вихідного порталю тунелю стрижневі аналоги були застосовані для одержання внутрішніх зусиль у перерізах склепіння та стінок (рис. 8).

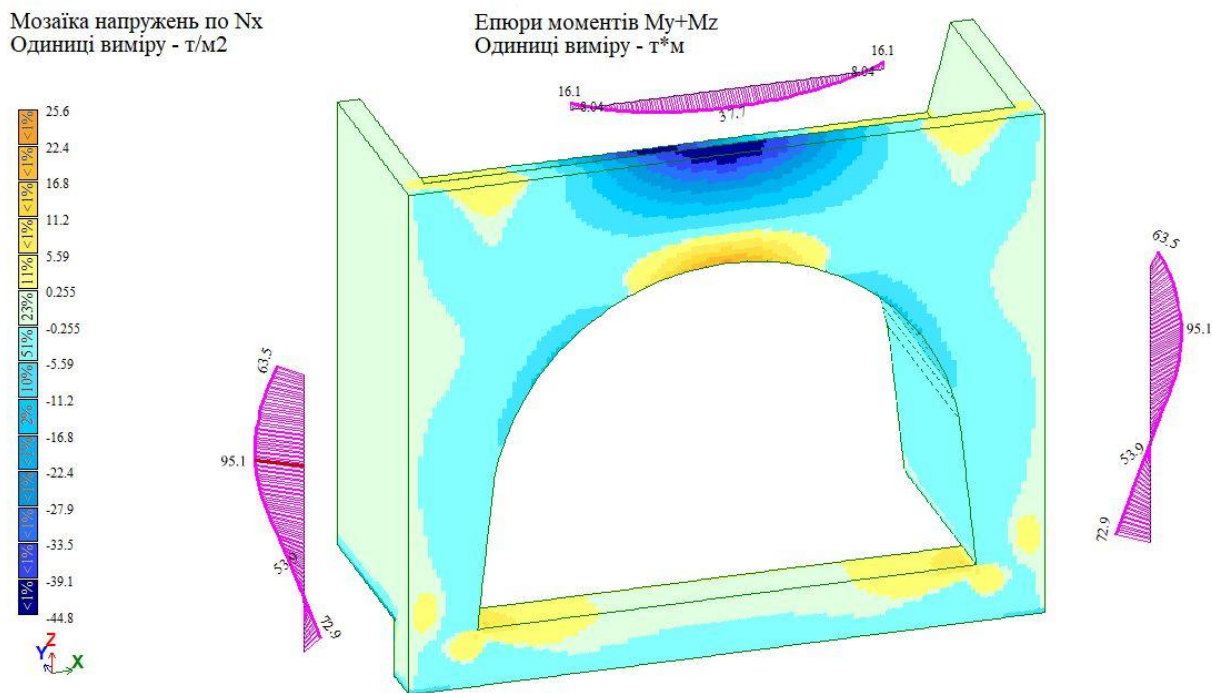


Рис. 8. Нормальні напруження та згинальні моменти в склепінні та стінках вихідного порталю тунелю, змодельованого об'ємними СЕ і стрижневими аналогами

Висновки. Наведена чисельно-аналітична методика обчислення внутрішніх зусиль у перерізах будівельних конструкцій має ряд переваг у разі застосування в розрахунках скінченно-елементних моделей.

По-перше, такий підхід передбачає максимальне збереження вигляду вихідної моделі з урахуванням міркувань інженера про доцільність вибору тих чи інших типів скінченних елементів, граничні розміри скінченно-елементної сітки та влаштування вузлів примикання конструкцій.

По-друге, для обчислення внутрішніх зусиль у складених перерізах конструкцій застосовують вузлові реакції скінченних елементів, що можна вважати аналогом інтегрування напружень за площею

поперечного перерізу [10]. Однак визначення напружень у довільних точках скінченних елементів, зокрема у вузлах, зазвичай може бути пов'язане з втратою точності. Запропонована методика дає змогу працювати зі скінченними елементами будь-якої розмірності та будь-якою математичною реалізацією, одержуючи достатньо точні результати, оскільки рівноваги у вузлах скінченно-елементної моделі завжди слід дотримуватися. З можливістю вибрати, які вузли та скінченні елементи слід залучати до обчислення внутрішніх зусиль у складених перерізах, а які ні, побічно вирішують проблему врахування концентрації напружень у місцях опор та інших точках сингулярності.

По-третє, застосування в скінченно-елементних моделях додаткових проміжних об'єктів, таких як поперечні перерізи простінків або стрижневі аналоги, часом може виявитися найбільш прийнятним підходом для автоматизованого конструювання елементів, робота яких близька до роботи стрижнів, оскільки нормативні вимоги орієнтують інженерів оцінювати несучу здатність і експлуатаційну придатність конструкцій

саме на основі інтегрованих внутрішніх зусиль у стрижневих поперечних перерізах.

Недоліком запропонованої методики можна назвати те, що для застосування вузлових реакцій з обчисленням внутрішніх зусиль необхідно, щоб скінченні елементи й вузли формували єдину площину складеного перерізу. Розв'язати цю задачу можуть інструменти автоматизації побудови скінченно-елементних моделей, які допоможуть згенерувати необхідні об'єкти та налаштувати сітку скінченних елементів.

Список використаних джерел

1. Барабаш М. С., Сорока М. М. Сур'янінов М. Г. Нелінійна будівельна механіка з ПК ЛІРА-САПР: монографія. Одеса : Екологія, 2018. 248 с.
2. Barabash M. S., Tomashevskiy A. V. Bar analogues for modelling of building structures. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020. Vol. 16. Iss. 3. P. 100 – 106.
3. Городецький О. С., Євзеров І. Д. Комп'ютерні моделі конструкцій. Київ : Факт, 2007. 394 с.
4. Городецький О. С., Барабаш М. С. Урахування нелінійної роботи залізобетонних конструкцій у практичних розрахунках. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*: зб. наук. праць. Дніпро: ПДАБА, 2014. Вип. 77. С. 54 – 59.
5. Gorodetskiy O. S., Barabash M. S., Romashkina M. A., Tomashevskiy A. V. «Characteristic load» principle. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020. Vol. 16. Iss. 2. P. 50 – 63.
6. Барабаш М. С. Комп'ютерне моделювання процесів життєвого циклу об'єктів будівництва : монографія. Київ: Сталь, 2014. 301 с.
7. Барабаш М. С. Вплив процесу зведення на просторову роботу несучих систем будівель. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*: зб. наук. праць. Дніпро: ПДАБА, 2012. № 65. С. 29 – 34.
8. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Довідник з опору матеріалів. Київ: Наукова думка, 1988. 736 с.
9. Barabash M. Some aspects of modelling nonlinear behaviour of reinforced concrete. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2018. Vol. 100. P. 164 – 171.
10. Gorodetskiy O. S., Barabash M. S., Filonenko Yu. B. Numerical Methods for Determining Stiffness Properties of a Bar Cross-Section. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. B. 55. Vol. 2. P. 180 – 188.

Томашевський Андрій Володимирович, інженер-програміст ТОВ «ЛІРА САПР», асистент кафедри комп'ютерних технологій будівництва, Національний авіаційний університет.
ORCID 0000-0001-5960-2100. Тел.: +38 (096) 225-38-42. E-mail: tomashevsky.a.v@gmail.com.

Andrii V. Tomashevskiy, software engineer «LIRA SAPR» LLC, lecturer assistant in Department of Computer Technologies for Construction, National Aviation University. ORCID 0000-0001-5960-2100. Tel.: +38 (096) 225-38-42. E-mail: tomashevsky.a.v@gmail.com.

Статтю прийнято 12.03.2025 р.

УДК 697.9

ВЕНТИЛЯЦІЙНІ СИСТЕМИ В ЦИВІЛЬНОМУ ТА ПРОМИСЛОВОМУ БУДІВНИЦТВІ: КОМПЛЕКСНИЙ ОГЛЯД І ШЛЯХИ МОДЕРНІЗАЦІЇ

Кандидати техн. наук Ю. І. Чайка, Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко, Р. Б. Ткаченко,
д-р техн. наук І. О. Редько

VENTILATION SYSTEMS IN CIVIL AND INDUSTRIAL CONSTRUCTION: A COMPREHENSIVE REVIEW AND MODERNIZATION PATHWAYS

PhD (Tech.) Y. I. Chaika, PhD (Tech.) Y. O. Burda, PhD (Tech.) Y. O. Pivnenko,
PhD (Tech.) R. B. Tkachenko, Dr. Sc. (Tech.) I. O. Redko

Анотація. У статті розглянуто вентиляційні системи в цивільному та промисловому будівництві з акцентом на їхнє сучасне функціонування та перспективи модернізації. Проаналізовано основні типи вентиляції, їхні технічні характеристики та особливості експлуатації в різних типах будівель. Окрему увагу приділено системам очищення повітря та зниженню шкідливих викидів, що є основним фактором у контексті екологічної безпеки. Запропоновано шляхи оптимізації вентиляційних мереж, впровадження енергоефективних технологій і автоматизації процесів для підвищення продуктивності та зниження витрат на обслуговування. Також проаналізовано відмінності у вимогах до вентиляції громадських і промислових будівель, що дає змогу врахувати специфіку кожного типу об'єкта. Дослідження базовано на актуальних наукових джерелах і включає порівняльний аналіз сучасних рішень для забезпечення комфортного та безпечного мікроклімату.

Ключові слова: вентиляційні системи, промислове будівництво, громадські будівлі, очищення повітря, модернізація вентиляції, енергоефективність.

Abstract. This article provides an in-depth analysis of ventilation systems in civil and industrial construction, focusing on their current state, challenges, and pathways for modernization. The research explores the design, operation, and maintenance of ventilation networks, emphasizing the critical role of air quality control in both public and industrial facilities. Special attention is given to air purification technologies that mitigate harmful emissions, contributing to environmental sustainability and compliance with modern safety standards. The study highlights the importance of balancing energy efficiency with performance by integrating advanced filtration systems, heat recovery units, and automated climate control solutions.

Furthermore, the article examines the distinct ventilation requirements of civil and industrial buildings, outlining the differences in air exchange rates, pollutant management strategies, and regulatory considerations. While civil buildings prioritize occupant comfort and indoor air quality, industrial facilities often face more complex demands due to high pollutant loads and process-generated contaminants. This contrast underscores the necessity for adaptive ventilation designs tailored to the specific needs of each building type.

The research also addresses key trends in ventilation modernization, including the adoption of smart building technologies, IoT-enabled sensors for real-time air quality monitoring, and the use of renewable energy sources to power ventilation systems. The integration of digital tools not only enhances system responsiveness but also enables predictive maintenance, reducing operational costs and extending equipment lifespan.

By synthesizing recent scientific literature and case studies, the article presents a comprehensive overview of best practices for optimizing ventilation systems. It advocates for a holistic approach that considers technological advancements, sustainability goals, and evolving building codes. The findings aim to provide engineers, architects, and facility managers with valuable insights to guide decision-making in designing and upgrading ventilation infrastructure. Ultimately, the research underscores the pivotal role of modern ventilation systems in fostering healthy, energy-efficient, and future-ready built environments.

Keywords: Ventilation systems, industrial construction, public buildings, air purification, ventilation modernization, energy efficiency.

Вступ. Вентиляційні системи відіграють головну роль у забезпеченні комфортних і безпечних умов перебування людей у громадських будівлях, а також у підтримці належних технологічних процесів на промислових об'єктах. Ефективний повітрообмін сприяє видаленню забруднень, регулюванню вологості, температури, що безпосередньо впливає на здоров'я людей, збереження будівельних конструкцій і оптимізацію виробничих процесів. У сучасному будівництві дедалі більше уваги приділяють не лише ефективності вентиляції, а й екологічним аспектам, таким як зниження викидів шкідливих речовин і мінімізація енергоспоживання.

Актуальність теми обумовлена зростаючими вимогами до якості повітря, посиленням екологічних норм і необхідністю впровадження інноваційних рішень для оптимізації роботи вентиляційних мереж. Громадські та промислові будівлі мають суттєві відмінності у вентиляційних потребах, що потребує комплексного підходу для проєктування, модернізації та експлуатації систем. Тому дослідження сучасних тенденцій, технологій очищення повітря та шляхів підвищення енергоефективності є важливим кроком до створення більш стійких і високопродуктивних вентиляційних рішень.

У цій роботі проаналізовано особливості функціонування вентиляційних систем у різних типах будівель, розглянуто сучасні методи очищення повітря та запропоновано шляхи вдосконалення

сучасних технологій. Результати дослідження можуть бути корисними для інженерів, архітекторів і фахівців з експлуатації будівель у контексті проєктування нових і модернізації наявних вентиляційних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері вентиляції громадських і промислових будівель зосереджені на підвищенні енергоефективності, зниженні негативного впливу на довкілля та інтеграції автоматизованих систем управління повітрообміном. У працях сучасних науковців досліджено новітні підходи для очищення вентиляційних викидів, включаючи використання адсорбційних фільтрів, електростатичних осаджувачів і плазмових технологій, що дають змогу суттєво зменшити концентрацію шкідливих речовин у повітрі [1, 2].

Значну увагу приділено питанням балансування вентиляційних систем у великих будівлях, де нерівномірний розподіл повітря може знижувати ефективність роботи всієї мережі. Дослідники пропонують впровадження інтелектуальних датчиків, які в режимі реального часу аналізують якість повітря та автоматично регулюють роботу вентиляційних установок для підтримання оптимальних параметрів мікроклімату [3].

Наукові публікації останніх років також висвітлюють різницю у вимогах до вентиляції громадських і промислових об'єктів. Наприклад, у громадських будівлях пріоритет надано створенню комфортних умов для людей, тоді як у

промислових приміщеннях основна увага зосереджена на ефективному видаленні шкідливих газів, пилу і надлишкового тепла, що утворюється в процесі виробництва [4, 5].

Однак аналіз літератури показує, що існує недостатня кількість комплексних досліджень, які б поєднували технічні, екологічні та економічні аспекти модернізації вентиляційних систем. Це свідчить про необхідність подальших досліджень для розроблення універсальних рішень, що враховують специфіку різних типів будівель, забезпечуючи при цьому оптимальний баланс між енергоефективністю і якістю повітря [6].

Визначення мети та завдання дослідження. Проаналізувати сучасний стан вентиляційних систем у громадських і промислових будівлях, виявити основні проблеми та розробити рекомендації щодо їх модернізації з урахуванням енергоефективності, якості повітря та екологічної безпеки.

Завдання дослідження:

- провести огляд наукової літератури і актуальних досліджень у сфері вентиляційних систем для виявлення основних тенденцій та інноваційних рішень;
- дослідити відмінності у вимогах до вентиляції громадських і промислових будівель, зокрема щодо повітрообміну, фільтрації та контролю викидів;
- проаналізувати сучасні методи очищення вентиляційних викидів та оцінити їхню ефективність для різних типів забруднень;
- оцінити можливості впровадження енергоефективних технологій, таких як рекуперація тепла, змінні витрати повітря (VAV-системи) і автоматизоване управління мікрокліматом;
- розробити практичні рекомендації щодо оптимізації вентиляційних мереж з урахуванням технічних, екологічних та економічних факторів;
- запропонувати напрями подальших досліджень для створення більш адаптивних

і стійких вентиляційних систем у сучасному будівництві.

Такий підхід допоможе створити ґрунтовну наукову базу для вдосконалення вентиляційних систем, що сприятиме підвищенню комфорту, безпеки та енергоефективності будівель.

Основна частина досліджень. Для початку необхідно класифікувати вентиляційні системи, використовувані в громадських і промислових будівлях. Вентиляційні системи можуть бути природними, механічними або змішаними. Природні системи забезпечують обмін повітря за рахунок різниці температур і тиску, тоді як механічні системи використовують вентилятори для примусового обміну повітрям. У промислових будівлях зазвичай застосовано механічні та комбіновані системи через високі вимоги до контролю за забрудненням повітря, тоді як у громадських будівлях можуть бути переважно природні або змішані системи [7].

Одним з основних завдань дослідження є вивчення впливу вентиляційних систем на навколишнє середовище та енергоефективність. Висока енергоємність вентиляційних установок може стати значною проблемою для зниження витрат на опалення, охолодження та вентиляцію. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є використання рекуперації тепла — технології, що дає змогу витягувати тепло з вихідного повітря і передавати його на припливне, що знижує загальне енергоспоживання будівлі. Також важливо враховувати впровадження автоматичних систем управління вентиляцією для оптимізації споживання енергії залежно від погодних умов, кількості людей у приміщенні або рівня забруднення повітря.

Важливою складовою вентиляційних систем є технології очищення повітря від забруднень. У промислових будівлях основними джерелами забруднення є шкідливі гази, пари, пил та інші шкідливі

частки, що виникають під час виробничих процесів. Очищення повітря здійснюється за допомогою фільтрів різних типів: механічних, електростатичних, хімічних або комбінованих. Вибір методу очищення залежить від типу забруднень і специфіки виробничого процесу. Також вивчають новітні технології, такі як плазмова обробка та фотокаталітичне очищення, які показують гарні результати в очищенні повітря від органічних забруднювачів [8].

Модернізація вентиляційних систем є важливою складовою розвитку будівельної галузі. Основний напрям модернізації – інтеграція інтелектуальних систем управління, що сприяють оптимізації витрат енергії і підвищенню ефективності роботи вентиляційних установок. За допомогою сенсорних технологій можна здійснювати моніторинг якості повітря в реальному часі, регулювати потоки повітря залежно від змін у зовнішніх умовах, а також автоматично очищати або фільтрувати повітря в разі необхідності. Застосування таких рішень дає змогу значно знизити витрати на обслуговування вентиляційних систем і продовжити їхній термін служби [9].

Громадські та промислові будівлі мають суттєві відмінності у вентиляційних вимогах. У громадських будівлях основним завданням є забезпечення комфортних умов для перебування людей, таких як регулювання температури та вологості повітря, що потребує точного розрахунку витрат повітря і відповідних систем кондиціонування. Водночас у промислових будівлях часто існує потреба у швидкому видаленні шкідливих газів і пилу, для чого потрібні значно більша потужність вентиляційних установок і застосування спеціалізованих фільтраційних систем. Різниця у вимогах до вентиляції потребує індивідуального підходу для проектування та вибору технологічних рішень для кожного типу будівлі [10].

Ураховуючи тенденції в розвитку технологій і зростаючі вимоги до ефективності та екологічності

вентиляційних систем, одним із напрямів для подальших досліджень є інтеграція вентиляційних мереж з іншими інженерними системами будівлі, такими як освітлення, опалення та охолодження. Це дасть змогу створити єдину автоматизовану систему управління мікрокліматом, що підвищить загальну ефективність і знизить енергоспоживання. Також необхідно дослідити вплив нових матеріалів і технологій на покращення експлуатаційних характеристик вентиляційних систем.

Порівняльна характеристика вентиляційних систем у громадських і промислових будівлях

Вентиляційні системи є необхідною частиною інженерного забезпечення як громадських, так і промислових будівель. Однак вимоги до їх проектування та функціонування значно відрізняються через особливості кожного типу будівель, що визначає складність і технічні характеристики вентиляційних систем.

Призначення та основні вимоги

Громадські будівлі. Основним завданням вентиляції в громадських будівлях є забезпечення комфортного мікроклімату для людей, що включає контроль температури, вологості, чистоти повітря та постійний повітрообмін. Такі будівлі потребують системи вентиляції, що забезпечує здоров'я та комфорт відвідувачів (наприклад в офісах, школах, лікарнях, магазинах). У цих випадках важливими є гнучкість системи для адаптації до різних умов (кількість людей, зміни погоди, рівень забруднення повітря тощо).

Промислові будівлі. Вентиляція промислових об'єктів має складніше завдання. Вона має не лише забезпечувати комфортні умови для працівників, а й видаляти шкідливі викиди, пил, газів, токсичні речовини, які утворюються в процесі виробничих операцій. Це потребує більш потужних і складних систем, здатних працювати в екстремальних умовах, з високою ефективністю очищення повітря та інтенсивним повітрообміном.

Типи вентиляційних систем

Громадські будівлі. У таких будівлях часто застосовано природні вентиляційні системи, змішаного типу або механічні системи вентиляції з регульованим повітрообміном. Для малих і середніх об'єктів використовують системи з природною вентиляцією, які зазвичай простіші та дешевші у встановленні. Для великих об'єктів (наприклад торгових центрів, офісних будівель) застосовують механічні системи, що можуть автоматично регулювати рівень вентиляції залежно від кількості людей чи температури.

Промислові будівлі. Вентиляція промислових об'єктів, зокрема для таких виробництв, як хімічні, металургійні, харчові тощо, зазвичай є більш складною і потужною. Тут використовують системи механічної вентиляції, здатні забезпечити високу продуктивність для видалення забруднень, а також системи очищення повітря (фільтрація, осадження пилу, хімічне очищення) для зниження шкідливих викидів у повітря. Часто для таких будівель також розробляють спеціалізовані системи рекуперації тепла, щоб знизити витрати на опалення або охолодження.

Енергоспоживання та енергоефективність

Громадські будівлі. Вентиляційні системи для громадських об'єктів зазвичай менш енергоємні, оскільки їхні вимоги щодо потоку повітря є менш інтенсивними. Водночас для сучасних технологій потрібне застосування енергоефективних рішень, таких як рекуперація тепла, використання вентиляційних установок із регулюванням витрати повітря (VAV-системи), щоб зменшити енергоспоживання.

Промислові будівлі. Вентиляційні системи промислових об'єктів значно складніші в енергетичному плані, оскільки вони потребують значно більших обсягів повітрообміну для підтримання здорових умов праці та забезпечення ефективної роботи очищення. Висока енергоємність таких систем часто є проблемою, тому

впровадження енергоефективних технологій, таких як рекуперація тепла та автоматизоване управління, є важливим аспектом.

Системи очищення повітря

Громадські будівлі. Вентиляційні системи в громадських будівлях часто не потребують складних технологій очищення повітря. Однак у деяких випадках для поліпшення якості повітря використовують фільтри, які очищають його від пилу, алергенів, запахів та інших забруднень.

Промислові будівлі. Для вентиляційних систем промислових будівель потрібні високоефективні фільтраційні системи для видалення токсичних газів, пилу, а також хімічних і біологічних забруднень. Часто використовують системи, що включають кілька етапів очищення, зокрема механічні, електростатичні, адсорбційні фільтри та фільтраційні установки з хімічними реагентами.

Складність проектування та обслуговування

Громадські будівлі. Проектування вентиляційних систем для громадських будівель, хоча і потребує врахування певних нормативів і вимог до комфортності, є менш складним через меншу потужність і менші вимоги до очищення повітря. Для обслуговування таких систем зазвичай потрібні менші витрати на технічне обслуговування та ремонт.

Промислові будівлі. Вентиляційні системи промислових будівель значно складніші, оскільки вони мають не тільки урахувати комфорт, але й забезпечувати ефективне очищення від забруднень, зниження впливу токсичних речовин, а також високу потужність і безперебійну роботу. Для цього потрібні спеціалізовані технічні знання та постійний моніторинг роботи системи, що збільшує складність її обслуговування та витрати на ремонт.

Модернізація систем вентиляції є важливою складовою забезпечення енергоефективності, екологічної безпеки та підвищення комфорту в громадських і

промислових будівлях. З розвитком новітніх технологій і збільшенням вимог до енергозбереження і якості повітря виникає необхідність адаптації наявних вентиляційних систем до сучасних умов. Шляхи та засоби модернізації можна поділити на кілька основних напрямів.

Впровадження енергоефективних технологій

Рекуперація тепла (рекуператори). Вентиляційні системи, оснащені рекуператорами, дають змогу значно знизити витрати енергії на опалення або охолодження будівлі. Рекуперація тепла полягає в передаванні теплової енергії від відпрацьованого повітря до припливного, що зменшує навантаження на систему опалення в зимовий період і кондиціонування влітку. Цей підхід є важливим для досягнення енергоефективності у великих громадських будівлях (торгові центри, офісні приміщення) і промислових об'єктах.

Інтелектуальні системи управління (АСКУ). Сучасні автоматизовані системи управління вентиляцією дають можливість точно регулювати витрати повітря залежно від кількості людей у приміщенні, температури, вологості та рівня забруднення. Це дає змогу значно знизити енергоспоживання, адже вентиляція буде працювати тільки тоді, коли це необхідно, і з оптимальними параметрами. Крім того, автоматизація допомагає забезпечити стабільну роботу системи за мінімальних витрат на обслуговування.

Модернізація фільтраційних систем

Використання вискоефективних фільтрів. Одним з основних напрямів модернізації є поліпшення систем очищення повітря. В умовах промислових об'єктів необхідно застосовувати вискоефективні фільтри для видалення пилу, токсичних газів та інших шкідливих домішок. Для цього використовують фільтри високої фільтрації, такі як HEPA-фільтри, електростатичні фільтри або хімічні абсорбери. Вони дають змогу знизити рівень

забруднення повітря і забезпечити безпечні умови праці для людей.

Механічне очищення повітря. Для видалення великих частинок пилу, а також хімічних забруднень використовують промислові фільтраційні системи з багатоступінчастою фільтрацією. Це дає змогу підвищити ефективність очищення та запобігти потраплянню шкідливих частинок у робочі зони.

Оптимізація повітрообміну та вентиляційних каналів

Заміна вентиляційних установок на більш продуктивні та енергоефективні. Заміна старих вентиляційних установок на нові, більш енергоефективні моделі, є одним із простих, але дієвих шляхів модернізації. Сучасні вентиляційні агрегати оснащені енергозберігаючими двигунами, інверторними приводами, що дає змогу зменшити споживану потужність з підтриманням необхідної ефективності. Такі системи можуть автоматично регулювати швидкість вентилятора залежно від навантаження, тим самим оптимізуючи витрати енергії.

Перевірка та очищення вентиляційних каналів. Систему вентиляції потрібно регулярно очищати і технічно обслуговувати, що особливо важливо для старих будівель. У процесі модернізації можуть бути передбачені заходи з перевірки та очищення вентиляційних каналів від накопичених забруднень і пилу, що може призвести до зниження ефективності вентиляції.

Розширення або перепроєктування вентиляційних каналів. У деяких випадках для досягнення більш рівномірного повітрообміну та покращення ефективності вентиляції може знадобитися перепроєктування або розширення вентиляційних каналів, особливо у великих будівлях із великою кількістю приміщень чи виробничих зон.

Впровадження систем кондиціонування та вентиляції з рекуперацією

Механічна вентиляція з рекуперацією. Модернізація вентиляційних систем у

громадських і промислових будівлях за допомогою механічних систем вентиляції з рекуперацією тепла дає змогу не лише підвищити ефективність повітрообміну, але й знизити витрати енергії на опалення та охолодження, що дає змогу одночасно підтримувати належний рівень вентиляції та енергоефективність, що є особливо важливим для великих комерційних і промислових приміщень.

Інтеграція кондиціонування та вентиляції. У сучасних громадських будівлях доцільно інтегрувати системи кондиціонування та вентиляції для досягнення оптимальних умов мікроклімату. Комбінація вентиляції з охолодженням дає змогу одночасно

забезпечувати достатній рівень повітрообміну та підтримувати комфортну температуру в приміщеннях.

Застосування інтелектуальних систем моніторингу та управління

Моніторинг якості повітря в реальному часі. Впровадження сучасних систем моніторингу якості повітря дає змогу здійснювати постійний контроль за рівнем забруднення, температурою, вологістю та іншими параметрами.

Узагальнені дані та характеристики наведені в таблиці.

На рисунку наведено графік порівняння вентиляційних систем у громадських і промислових будівлях.

Таблиця

Порівняння характеристик вентиляційних систем у громадських і промислових будівлях

Параметр	Громадські будівлі (офіси, торгові центри)	Промислові будівлі (фабрики, заводи)
Тип вентиляційної системи	Механічна, природна, змішана	Механічна, з високим рівнем фільтрації
Система очищення повітря	Фільтрація від пилу, бактерій, запахів	Мультирівнева фільтрація (HEPA, електростатичні)
Продуктивність системи	5000-20 000 м³/год	20 000-100 000 м³/год
Енергоспоживання	10-50 % загальних витрат енергії	30-70 % загальних витрат енергії
Рекуперація тепла	Використано в деяких системах	Широко використана для зниження енергоспоживання
Автоматизація управління	Автоматичне регулювання витрат повітря, температури	Система автоматизації з інтелектуальним управлінням
Основні технології очищення	Механічні фільтри, фільтри від запахів, вентиляція з очищенням	Адсорбційні фільтри, хімічне очищення, електростатичні фільтри
Термін служби системи	10-15 років	15-25 років
Кількість навченого персоналу	Одна-дві особи на об'єкт	Три-п'ять осіб на великий об'єкт
Вартість модернізації	Відносно низька залежно від типу установки	Висока через спеціалізовані технології

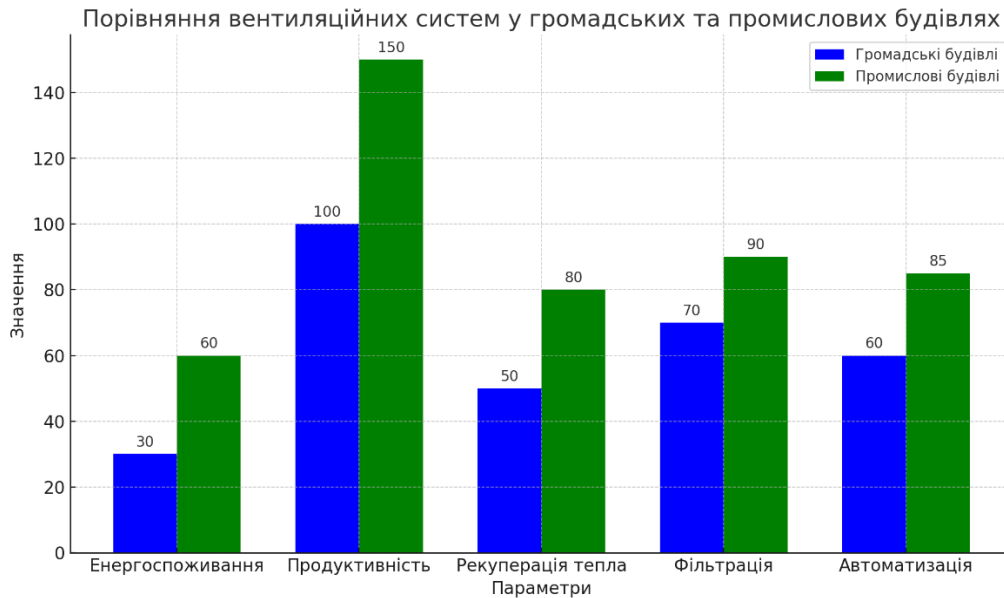


Рис. Графік порівняння вентиляційних систем у громадських і промислових будівлях

Аналіз сучасних вентиляційних систем у цивільному та промисловому будівництві показав, що основними вимогами до їх проектування є енергоефективність, надійність і дотримання екологічних стандартів. Вентиляція має важливе значення для забезпечення комфортних умов перебування людей, а також підтримання оптимальних технологічних параметрів у виробничих приміщеннях.

Основні проблеми, що виникають у системах вентиляції, включають неефективне використання енергоресурсів, низьку надійність старих установок, а також застаріле обладнання. Ці фактори часто спричиняють високі експлуатаційні витрати і знижують якість повітря в приміщеннях.

Висновки. Дослідження показують, що сучасні вентиляційні системи, як у цивільному, так і промисловому будівництві, відіграють головну роль у забезпеченні комфортних і безпечних умов для людей, а також у підтриманні ефективності виробничих процесів. Вивчення літератури свідчить про те, що більшість сучасних систем мають значні

недоліки, зокрема в частині енергоефективності та надійності. Система вентиляції є важливою складовою інфраструктури будь-якого будівництва, оскільки від її ефективності залежить не тільки комфорт перебування людей, але й безпека, особливо у промислових приміщеннях, де недостатня вентиляція може призвести до техногенних катастроф або загрози здоров'ю працівників.

Основними проблемами, виявленими під час дослідження, є застаріле обладнання, високе споживання енергії та низька ефективність наявних вентиляційних систем. Це спричиняє як додаткові витрати на експлуатацію, так і підвищену загрозу для навколишнього середовища через нераціональне використання ресурсів. Модернізація системи вентиляції є основним етапом у вирішенні цих проблем. Поглиблене впровадження інноваційних технологій, таких як системи автоматизованого управління, використання енергоефективних агрегатів і рекуперація тепла, може значно знизити витрати енергії та підвищити ефективність роботи системи.

Зважаючи на вищезазначене, запропонованими шляхами вирішення проблеми є оновлення застарілих вентиляційних систем, інвестування в сучасні технології, а також підвищення кваліфікації фахівців для ефективного управління та обслуговування нових систем. Крім того, важливо сприяти розвитку нормативно-правової бази, що стимулюватиме модернізацію

вентиляційних систем у межах державних програм, орієнтованих на забезпечення енергоефективності та зниження негативного впливу на екологічну ситуацію. У результаті впровадження цих змін допоможе значно підвищити якість повітря, знизити енергетичні витрати і покращити загальний рівень безпеки в будівництві, що стане основою для сталого розвитку галузі.

Список використаних джерел

1. Lintao Fan and all. Temperature field analysis in tunnel construction ventilation with emphasis on duct leakage and thermal conductivity. *Case Studies in Thermal Engineering*. September 2024. Vol. 61. 105102. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105102>.
2. Ming-Rui Luo and all. Effect of tunnel ventilation on surrounding rock temperature field and heat regulating circle during construction phase. *Tunnelling and Underground Space Technology*. August 2024. Vol. 150. 105835. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105835>.
3. Ping Guo and all. Coupled diffusion law of windflow-dust, respiratory zone exposure levels and simulated dust reduction in industrial building re-construction. *Science of The Total Environment*. 10 December 2024. Vol. 955. 177240.
4. Ming Lu and all. A new approach in calculation of heat release during high geothermal tunnels construction considering ventilation time effect. *International Journal of Thermal Sciences*. December 2023. Vol. 194. 108589.
5. Chen Ren and all. Construction of linear temperature model using non-dimensional heat exchange ratio: Towards fast prediction of indoor temperature and heating, ventilation and air conditioning systems control. *Energy and Buildings*. 15 November 2021. Vol. 251. 111351. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111351>.
6. Rong Liu and all. Tunnel construction ventilation frequency-control based on radial basis function neural network. *Automation in Construction*. October 2020. Vol. 118. 103293. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103293>.
7. Mukesh Kumar Dubey and all. Need for rating system for assessing sustainability of built environment during construction stage. *Total Environment Research Themes*. September 2023. Vol. 7. 100061. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100061>.
8. Burda Yu., Pivnenko Yu., Cherednik A., Chaika Yu., Tkachenko R. Analysis of the cleaning efficiency of gas emissions from the venturi scrubber. *V Міжнар. наук.-практ. конф. «CURRENT CHALLENGES OF SCIENCE AND EDUCATION»*, 15-17.01.2024. P. 140–147.
9. Pouya Baradaran-Noveiri and all. Parametric-based design optimization of air distribution system in panelized construction. *Journal of Building Engineering*. 1 July 2022. Vol. 51. 104254.
10. Ping Guo and all. Dynamic health risk assessment model for construction dust hazards in the reuse of industrial buildings. *Building and Environment*. 15 February 2022. Vol. 210, 108736. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108736>.

Чайка Юрій Іванович, кандидат технічних наук, в. о. завідувача кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: yurii.chaika@kname.edu.ua. ORCID ID 0000-0003-1021-4662.

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

E-mail: science.yurii.burda@gmail.com. ORCID ID 0000-0003-3470-1334.

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

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

Ткаченко Роман Борисович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID 0000-0003-3899-1826. E-mail: roman.tkachenko@kname.edu.ua.

Редько Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри ТТДЕМ, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID orcid.org/ 0009-0005-1556-0830.

E-mail: ihorredko1972@gmail.com.

Yurii Chaika Ph.D., Head of the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: yurii.chaika@kname.edu.ua. ORCID ID 0000-0003-1021-4662.

Yurii Burda, Ph.D., Docent at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: Yurii.Burda@kname.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-3470-1334.

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

Roman Tkachenko, Ph.D., Docent at the Department of Heating, Gas Supply, and Ventilation, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov. E-mail: roman.tkachenko@kname.edu.ua. ORCID ID: 0009-0005-1556-0830.

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

Статтю прийнято 14.03.2025 р.

УДК 69:624.05

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВЛАШТУВАННЯ КОРОТКИХ ШПУНТОВИХ СТІН В УМОВАХ УЩІЛЬНЕНОЇ ЗАБУДОВИ

Канд. техн. наук І. Б. Мудрий, асп. М. М. Фречка

FEATURES OF THE TECHNOLOGY OF INSTALLING SHORT SHEET PILE WALLS IN THE CONDITIONS OF A COMPACTED BUILDINGS

PhD (Tech.) I. Mudryy, postgraduate student M. Frechka

***Анотація.** У статті розглянуто вимоги до застосування методів механізації в умовах ущільненої забудови з влаштуванням пальових фундаментів на основі попереднього аналізу ряду параметрів: інженерного та геологічного стану майданчика; внутрішньої стисливості та зовнішньої будівельного майданчика; габаритів ведучого механізму; майданчиків для розміщення додаткового обладнання, складів, розвантажувальних майданчиків. Визначено основні умови і технології влаштування міжпальового заповнення для шпунтових стін. Запропоновано конструктивно-технологічне рішення влаштування міжпальового заповнення*

для коротких шпунтових стін, виконаних за ручною технологією. Запропоновано технологічні етапи зведення монолітних залізобетонних шпунтових стін за допомогою ручного бура. Наведено результат практичної реалізації запропонованої технології.

Ключові слова: малогабаритна бурова установка, шпунтова стіна, технологія буріння свердловин, ручний бур, міжпальовий простір; стислі умови будівництва.

Abstract. In the context of modern urban development, the challenge of constructing buildings and structures within densely populated areas is particularly pressing. The technologies employed in such scenarios are predominantly based on creating sheet pile walls or protective screens between existing and proposed structures to avoid impact on the subsoil beneath existing foundations. The article explores the requirements for applying mechanization methods in constructing pile foundations under the constraints of dense urban development. The study is based on an analysis of several critical parameters, including the engineering and geological conditions of the site, the compressibility of the ground, the dimensions of the construction site, and the space available for additional equipment, storage, and unloading areas. It identifies the key conditions and technologies for arranging inter-pile fillings for sheet pile walls. A structural and technological solution is proposed for manually constructing inter-pile filling in short sheet pile walls. The article also outlines the technological stages for erecting monolithic reinforced concrete sheet pile walls using a manual auger. The practical implementation of the proposed technology for foundation construction with a compatible sheet pile wall effectively avoids impacting neighboring structures in areas adjacent to existing foundations. Technological control over the construction stages is crucial to ensuring the bearing capacity of sheet pile barriers of this type. Additional research is needed to develop an engineering methodology for calculating the performance of short sheet piles in such foundation systems. Finally, it presents the practical results of implementing the proposed technology, demonstrating its feasibility and effectiveness.

Keywords: compact drilling rig, sheet pile wall, borehole drilling technology, manual auger, inter-pile space, constrained construction conditions.

Вступ. У сучасних умовах активного освоєння міських територій постає питання необхідності зведення нових об'єктів на вже забудованих ділянках. Це зумовлено обмеженою кількістю вільних ділянок у межах міст, а також потребою раціонального використання наявних територій. Будівництво в умовах щільної забудови супроводжено різними технічними та організаційними викликами, пов'язаними зі взаємодією нових конструкцій із наявними спорудами.

Особливу увагу слід приділяти будівництву, що передбачає примикання нових будівель до вже наявних. У таких випадках одним із основних аспектів є вплив нового будівництва на несучу здатність основи під фундаментами наявних споруд, який потрібно враховувати не лише під час зведення, а й у процесі експлуатації.

Порушення стабільності основи може спричинити деформації або руйнування будівель.

За чинними нормативними вимогами, щодо будівництва в умовах ущільненої забудови необхідно впроваджувати комплексні заходи з планування та організації робіт [1]. Ці рішення мають унеможлилювати вплив нових споруд на навколишню забудову як зі зведенням, так і експлуатацією об'єкта. У сучасних умовах будівництва використовують ряд конкурентних технологій улаштування шпунтів для унеможливлення такого впливу [2-4]:

- стіни з інвентарних шпунтових елементів;
- стіни з буронабивних (буроін'єкційних) паль із забірною;
- стіна у «ґрунті»;
- метод «січних» паль.

Реалізація таких технологічних рішень має ряд обмежень у процесі їх реалізації, викликаних динамічними навантаженнями; перезволоженням ґрунтів основи; зменшенням корисного простору у проєктованих спорудах; обмеженням доступом.

Крім того, для цих технологій потрібен значний простір для реалізації, використання важкої будівельної техніки та певного спеціалізованого обладнання. Це викликає певні обмеження у стиснених умовах будівельного майданчика, де робота великогабаритної техніки є ускладненою або неможливою. Реалізація вказаних вище рішень потребує технологічного відступу від сучасних конструкцій (1,2...1,5 м) через габарити обладнання та особливості процесу його роботи.

Для вирішення питання організації шпунтових конструкцій в умовах внутрішньої стисливості будівельного майданчика пропонується використовувати технологію влаштування коротких буронабивних паль. Ці палі можуть бути виконані з використанням малих самохідних бурових установок або вручну з використанням спеціалізованих бурових інструментів. Така технологія дає змогу ефективно використовувати обмежені ресурси простору.

Постановка проблеми. Аналіз діаметра буронабивних паль, які можуть виконувати на будівельному майданчику самохідні малогабаритні бурові установки масою до 4,0 т, показує, що вони змінюються в межах поширених типорозмірів коротких буронабивних паль діаметром 200-520 мм (рис. 1).

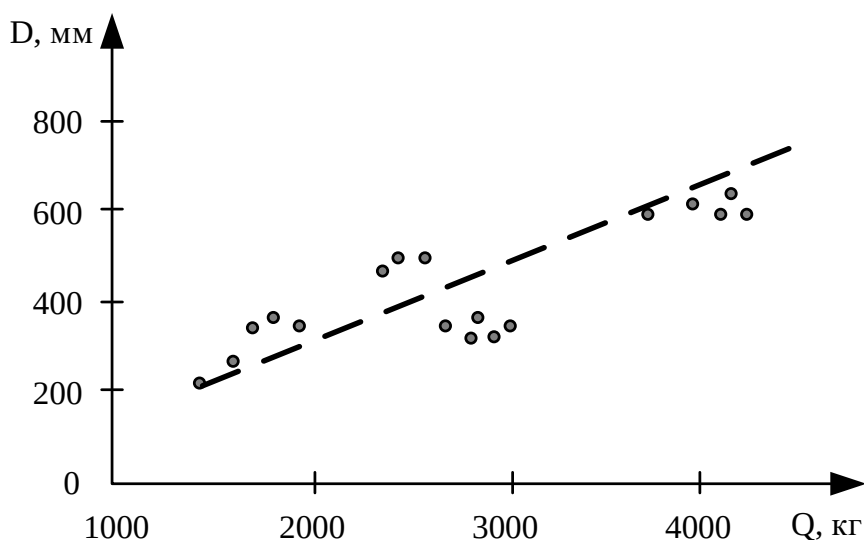


Рис. 1. Зміна максимального діаметра свердловини (D) залежно від маси (Q) малогабаритної самохідної бурової установки

Досвід використання малих самохідних бурових машин свідчить, що в стиснених умовах будівельних майданчиків виникають «мертві зони», ділянки, де робота і розміщення бурових машин є обмеженими чи неможливими через технічні перешкоди. Такі обмеження

ускладнюють проведення робіт і потребують оперативної зміни ухвалених проєктних рішень на етапі будівництва.

Виявити такі обмеження зазвичай можна лише з розробленням технологічних карт, за уточнених просторових умов будівельного майданчика та фактично

наявних у підрядника засобів механізації. На цьому етапі для уточнення проєктних рішень необхідним є аналіз:

- обмежень із можливості використання певного технологічного обладнання;
- просторових параметрів бурової машини і навколишньої забудови;
- застосованої технології буріння свердловин (коронкове, шнекове, метод витіснення).

Для вирішення питання застосування машин в умовах стисненого простору будівельного майданчика в роботі [5] проаналізовано основні габаритні

параметри, які впливають на вибір технології виконання паль з використанням нединамічних методів буріння. У табл. 1 наведено результати аналізу таких чинників, зокрема необхідної зони доступу, габаритних розмірів установки та віддалі наближення до наявних конструкцій.

Використання таких даних дає змогу обґрунтувати вибір технологій і необхідного обладнання для влаштування паль, знизити ризики утворення «мертвих зон», підвищити ефективність і якість процесу зведення в стиснених умовах будівельного майданчика.

Таблиця 1

Технічні показники для вибору методу виконання паль у стиснених умовах будівельного майданчика [5]

Метод влаштування паль	Показник		
	Мінімальна площа зони робіт, м ²	Мінімальне зближення до конструкцій, м	Максимальна продуктивність робіт, м пог./зміна
Занурення паль заводського виготовлення			
вдавлювання	170...395	1,0...3,6	150
Виконання буронабивних паль			
прохідний шнек	340	0,90	250
в обсадних трубах	390...410	1,2...1,6	40,0
під захистом глинистого розчину	90,0	0,3...0,6	40,0
Виконання набивних паль			
витісненням	320	0,90	200
типу «фундекс»	315	0,90	200

За табл. 1, мінімальна відстань, із якої механізовано можна виконати шпунтову стіну поряд із наявними конструкціями за допомогою сухих технологій буріння свердловин, складає 0,9 м. Ця відстань визначена технічними характеристиками механізму, габаритними параметрами бурової установки, а також вимогами з безпеки виконання робіт у безпосередній близькості до наявних конструкцій.

Практичний досвід проведення робіт на будівельному майданчику свідчить, що свердловини можна виконувати на меншій відстані від наявних конструкцій, використовуючи ручний буровий інструмент (рис. 2). Використання ручних бурів дає змогу облаштовувати свердловини у ґрунтах I-III групи на глибину до 5 м, що є достатнім для зведення неглибоких шпунтових конструкцій. Цей метод дає

змогу зменшити вплив на наявні конструкції та мінімізувати ризики пошкоджень, що є критично важливим для роботи в умовах ущільненої міської забудови.

На рис. 2 наведено приклад облаштування свердловини з використанням ручного бурового інструменту. Цей метод забезпечує зручність і гнучкість у реалізації проектних рішень, особливо у випадках, коли доступ великогабаритної техніки є складним або взагалі неможливим. Завдяки простоті та

мобільності ручного обладнання вдається оперативно виконувати необхідні бурові роботи, що сприяє оптимізації термінів будівництва та зниженню загальних витрат на виконання шпунтових конструкцій. За допомогою ручного буріння можна виконувати роботи в обмеженому просторі; мінімізувати рівень шуму та вібрації; підвищити точність розташування свердловин, що дає змогу враховувати особливості об'єкта і наявність перешкод (наявних комунікацій).



а



б



в

Рис. 2. Технологічні елементи паль, виконаних ручним буром:
а – ручний буровий інструмент; б – загальний вигляд свердловини;
в – встановлення арматурного каркаса

У випадках, коли заповнення міжпальового простору шпунтів виконують у монолітному бетонному або

залізобетонному варіанті, конструкція може мати подвійну функцію:

- кріплення вертикальних стін земляної споруди;

- стіни підвального приміщення (відповідно до конструктивних вимог).

При цьому необхідно враховувати обмеження, встановлені чинними нормативними вимогами проектування [6], які регламентують мінімально допустиму відстань між палями, коли шпунтова стіна виконує функцію несучої конструкції фундаменту. Недотримання цих норм може призвести до зниження несучої здатності фундаментів і створити ризики можливих деформації або руйнування конструкцій.

Виклад основного матеріалу. Для пальових шпунтових стін із відкритим простором між палями у процесі тривалої експлуатації характерне явище суфозії, вимивання ґрунту, чи його зсування. Зазвичай для заповнення міжпальового простору використовують ряд способів:

- збірні дерев'яні щити (рис. 3, а).

Рішення доцільне за швидкої та економічної

реалізації шпунтових стін. Неналежна герметизація між щитами і палями може призводити до утворення щілин, через які можливе просочування ґрунту або води. У багатьох випадках щити є тимчасовим рішенням і потребують демонтажу після завершення робіт, що додає етапів до загального процесу будівництва;

- монолітний залізобетон у збірний (інвентарний) опалубці (рис. 3, б). Заповнення міжпальового простору залізобетоном створює суцільну монолітну стіну без щілин, що підвищує стійкість до впливу зовнішніх чинників, має тривалий термін служби та робить його економічно вигідним рішенням у довгостроковій перспективі. Але роботи з бетонування таких стін складно виконувати за низьких температур або несприятливих погодних умов, що може потребувати додаткових заходів, таких як утеплення чи використання спеціальних добавок у бетон.



а



б

Рис. 3. Використовувані способи:

а – збірні дерев'яні щити; б – монолітний залізобетон (до заливки бетону)

Такі технології мають спільний недолік – необхідність розроблення земляної споруди для можливості

влаштування міжпальового заповнення (рис. 4, а). На цьому етапі можуть виникати суфозійні процеси, викликані нещільним

приляганням елементів заповнення до ґрунту або динамічним впливом на пальі з введенням елементів заповнення (рис. 4, б).

На практиці часто розкриття міжпальового простору виконують на всю висоту виїмки.



а



б

Рис. 4. Вигляд окремих етапів влаштування шпунтових стін:
а – розробка земляної споруди; б – зсування ґрунту між пальями

Уникнути цього недоліку можна із застосуванням технології влаштування неглибоких підпірних стінок «насухо». У роботі [7] зазначено, і досвід зведення це підтверджує, що вертикальні укоси земляних споруд зберігають свою стійкість у разі їх короткотривалого стояння терміном 1–2 доби. Відповідно можна створювати вузькі щілинні виїмки ґрунту на короткі періоди часу без кріплення стінок земляної споруди за умови дотримання всіх обмежень за безпекою. Для реалізації такої технології пропоновано конструктивно-технологічне рішення за такими етапами зведення:

Етап I. Влаштування буронабивних паль із використання ручних бурів:

- пальі влаштовують із поверхні, яка технологічно забезпечує доступ бурового обладнання та унеможливорює випирання ґрунту з-під фундаментів;
- крок, діаметр і довжина паль визначені розрахунком.

Етап II. Виконання щілини за допомогою ручного бура:

- виїмання ґрунту виконують покроково окремими циліндричними елементами;

- глибину щілини приймають за заданими конструктивними чи планувальними вимогами.

Етап III. Зрізання «ціликів» ґрунту між свердловинами:

- зрізання (вирівнювання стінок) ручним буром зверху вниз;

- виїмання недобору ґрунту (зачищення), який утворюється внаслідок осипання з вирівнюванням стінок щілини. Якщо не зачистити, ґрунт залишається у свердловині і ущільнюється вагою бетону з бетонуванням щілини.

Етап IV. Влаштування бетонної чи залізобетонної міжпальнової стіни методом «у розпір»:

- бетонування методом вкладання бетону для стінових конструкцій;
- влаштування балки обв'язки по пальях.

Таке конструктивне рішення з відповідними технологічними вказівками

використано для зведення шпунтових огорожень у сучасній забудові для будівництва чотириповерхового житлового

будинку в м. Львові на вулиці Шевченка, 154 (рис. 5).

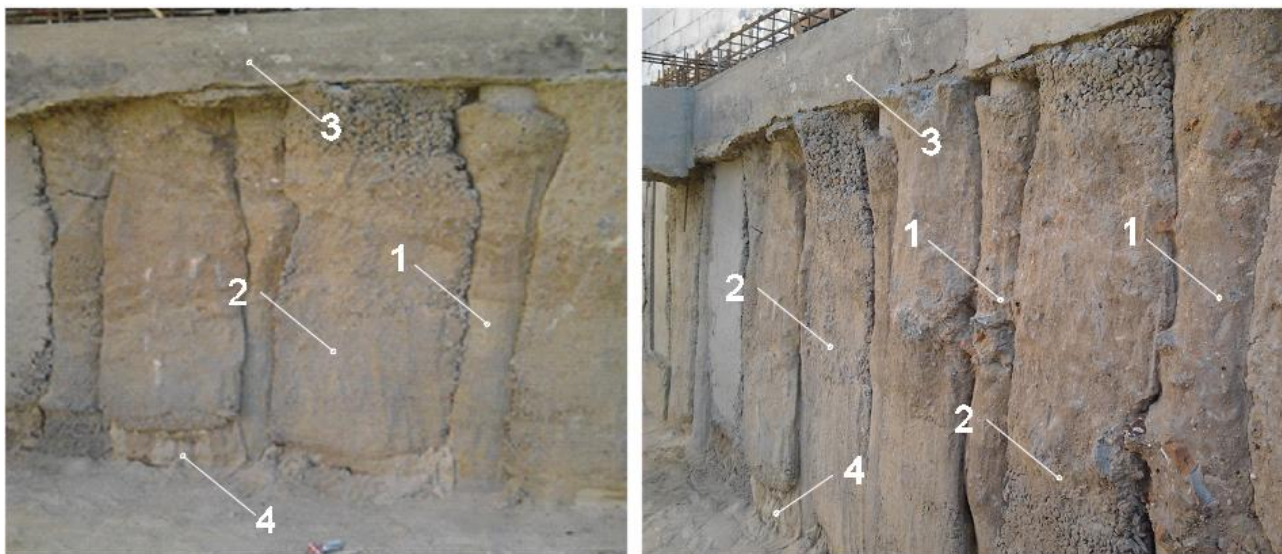


Рис. 5. Реалізація пропонованої технології (загальний вигляд монолітної шпунтової бетонної підпірної стінки): 1 – буронабивна залізобетонна паля; 2 – міжпальовий простір заповнений бетоном; 3 – монолітна залізобетонна балка обв'язки; 4 – недобір ґрунту

Висновки. Практична реалізація технології влаштування шпунтових стін за допомогою ручного буріння показує, що:

- шпунтові стіни, виконані методом ручного буріння, можна влаштовувати поряд із наявними конструкціями;
- монолітні конструкції міжпальового заповнення шпунтових стін мають значне відхилення від вертикалі (8 ... 15 см);
- наявні незаповнені щілини між палями та міжпальовим монолітним заповненням;

- відсутня можливість контролю якості вібрування в певних шарах конструкції міжпальового заповнення.

Загалом пропоновану технологію можна використовувати для влаштування коротких шпунтових стін (до 3 м глибиною), які не є стінами підвальних приміщень. Потрібен додатковий аналіз геометричних параметрів монолітної міжпальової вставки залежно від типу ґрунту, навантаження та відстані між палями.

Список використаних джерел

1. ДБН А.3.2-2-2009. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд, 2012. 25 с.
2. Якименко О. В. Сучасні методи влаштування паль та шпунтових обгороджень: навч. посіб. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 119 с.
3. Das B. M. (2011). Principles of Foundation Engineering. 7th Edition. Stamford, CT: Cengage Learning.

4. Gaba A. R., Simpson B., Powrie W. & Beadman D. R. (2003). Embedded Retaining Walls – Guidance for Economic Design. London: Thomas Telford Publishing.
 5. Haido A.N. Osobennosti razrabotky proektov proyzvodstva rabot po ustroistvu svainykh fundamentov v stesnennykh usloviyakh horodskoi zastroiky. *Vestnyk PNYPU. Stroytelstvo y arkhytektura*. 2017. T. 8, № 4. S. 74–85.
 6. ДБН В.2.1-10:2018. Основи та фундаменти будівель і споруд. Київ: Мінрегіон України, 2018.
 7. Беляков Ю. И., Иванейко И. Д. О проектировании откосов котлованов и траншей. *Стр. производство*. 1995. Вып. 35. С. 28-33.
-

Мудрий Ігор Богданович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельного виробництва, інститут будівництва та інженерних систем, Національний університет «Львівська політехніка».

ORCID iD: 0000-0003-1053-6071. E-mail: igor.b.mudryi@lpnu.ua.

Фречка Михайло Михайлович, аспірант кафедри будівельних конструкцій та мостів, інститут будівництва та інженерних систем, Національний університет «Львівська політехніка». ORCID iD: 0009-0002-9623-476X. E-mail: mykhailo.m.frechka@lpnu.ua.

Mudryy Igor Bohdanovych, PhD (Tech.), docent, Department of Building Production, Institute of Civil Engineering and Building Systems, Lviv Polytechnic National University. ORCID iD: 0000-0003-1053-6071.

E-mail: igor.b.mudryi@lpnu.ua.

Frechka Mykhailo Mykhailovych, postgraduate student, Department of Building Constructions and Bridges, Institute of Civil Engineering and Building Systems, Lviv Polytechnic National University. ORCID iD: 0009-0002-9623-476X.

E-mail: mykhailo.m.frechka@lpnu.ua.

Статтю прийнято 27.03.2025 р.

УДК 624.016:624.04

ЗМІНА ВІДНОСНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ВОЛОКОН СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОГО ПЕРЕКРИТТЯ СХОВИЩ ПІД ЧАС БІСТАДІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЙОГО ВИГОТОВЛЕННЯ

Доктори техн. наук О. В. Семко, А. В. Гасенко,
канд. техн. наук Л. В. Гасенко, І. В. Мудрий

THE FIBERS OF THE STEEL REINFORCED CONCRETE SLAB STRAIN CHANGE FOR SHELTER OF THE CIVIL PROTECTION DURING THE TWO-STAGE TECHNOLOGY OF SLAB MANUFACTURING

Dr. Sc. (Tehn.) O. V. Semko, Dr. Sc. (Tehn.) A. V. Hasenko,
PhD (Tehn.) L. V. Hasenko, I. V. Mudryy

Анотація. У статті проаналізовано причину дволінійного вигляду (розривність лінійного вигляду на межі верхньої полицьки сталевих двотавра та низу бетонної плити) діаграми відносних деформацій у поперечному перерізі сталезалізобетонних перекриттів, утворених під час бістадійного їх виготовлення. У процесі експериментальних випробувань фрагмента сталезалізобетонного перекриття за показаннями електротензорезисторів

отримано аналогічну теоретичній діаграму зміни відносних деформацій. Це ще раз доводить різний початковий напружено-деформований стан компонентів композитної конструкції.

Ключові слова: сталезалізобетон, перекриття, поперечний переріз, відносні деформації, доволінійність, теоретичний аналіз, експеримент.

Abstract. There are often no technical specifications and technological maps for the installation of built-in shelters in existing structural and planning schemes of buildings. Atypical architectural and structural solutions for protective structures can be implemented using monolithic or precast concrete and steel-reinforced concrete structures. Due to the two-stage technology for the manufacture of precast steel reinforced concrete slabs, the geometric characteristics of their composite cross-sections change during the manufacturing process. Changes in cross-sections of building structure elements during the manufacturing process are commonly referred to as genetic nonlinearity. At the same time, in most cases, the change (increase due to the monolithic upper concrete shelf) of the cross-section of a steel-reinforced concrete slab element occurs under different deformations in its components: the existing deformations in the steel part from the dead weight of the monolithic concrete slab and the absence of deformations in the monolithic concrete slab. This fact is the reason for the bilinear appearance (discontinuity of the linear appearance at the border of the upper shelf of the steel I-beam and the bottom of the concrete slab) of the diagram of strains in the cross section of steel reinforced concrete slabs. It is possible to avoid the genetic nonlinearity of steel reinforced concrete slabs by installing temporary supports for steel beams during the concreting of the monolithic slab or by constructing the monolithic slab on inventory temporary formwork. By installing the above-mentioned temporary posts, it is possible, on the contrary, to achieve favorable pre-stresses in the components, which can be called self-stressing of such slabs. During the experimental loading of a fragment of a pre-stressing steel-reinforced concrete slab, the increase in relative deformations along the height of the cross-section, taking into account the pre-bending of steel beams, is similar to those predicted during the theoretical analysis of the stress-strain state of such beams. Taking into account the pre-stressing of the steel beams allowed us to reduce their cross-section from a rolled I-beam № 45 to an I-beam № 36 with a strip along the bottom girdle, which reduces steel consumption by 11.1 %.

Keywords: steel reinforced concrete, floor, cross section, strain, bilinearity, theoretical analysis, experiment.

Вступ. В умовах воєнного стану в Україні актуальним є розширення фонду захисних споруд цивільного захисту населення. Одним із рішень є влаштування вбудованих укриттів у наявних конструктивно-планувальних схемах будівель [1]. Для вирішення цієї проблеми інженерам-проектувальникам потрібні індивідуальні нетипові конструктивні рішення і технології влаштування.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Сучасне будівництво наразі охоплює як нові, так і невідкладно необхідні відновлювальні, викликані воєнними діями,

конструктивно-планувальні рішення споруд цивільного захисту на об'єктах громадського та виробничого призначення України. Відповідно будівництво потребує багатофункціональних, інтегрованих у громадський простір планувальних схем і економічних несучих конструкцій із високим рівнем надійності, живучості та ремонтпридатності. Перерахованим вимогам відповідають сталезалізобетонні конструкції [2].

Робота виконана в рамках держбюджетної дослідної теми в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»: «Ресурсоекономні конструкції та

планувальні рішення сталезалізобетонних систем для споруд цивільного захисту в нових та реконструйованих будівлях» (державний реєстраційний номер 0123U102068).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільшими дослідженнями методів визначення несучої здатності композитних сталезалізобетонних конструкцій на території України займалися вчені наукових шкіл у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Українському державному університеті залізничного транспорту, Національному університеті «Львівська політехніка» та ін. В опублікованих результатах робіт вітчизняних і закордонних наукових шкіл доведено, що класична модель напружено-деформованого стану композитних брусів, яка ґрунтується на класичній моделі напружено-деформованого стану, з достатньою точністю відображує реальні значення несучої здатності та жорсткості сталезалізобетонних двотаврових балок із залізобетонним верхнім поясом і може бути рекомендована для розрахунку таких конструкцій [3, 4]; використано граничні деформації матеріалів для оцінювання міцності конструкційного бетону та залізобетону [5]; вивчено особливості роботи трикомпонентних сталезалізобетонних конструкцій на етапі монтажу [6]; розглянуто методи створення попередніх самонапружень на етапі монтажу у згинаних сталезалізобетонних конструкціях [7]; доведено можливість і ефективність застосування чисельного дослідження композитних конструкцій за допомогою методу скінченних елементів із урахуванням фізичної та конструктивної нелінійностей [8].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Для спрощення проєктно-конструкторських робіт у розрахунках несучої здатності композитних сталезалізобетонних перекриттів не завжди

враховують наявність початкового напружено-деформованого стану сталевих балок на момент забезпечення сумісної їхньої роботи з монолітною залізобетонною плитою.

Визначення мети та задачі дослідження: виконати аналіз зміни відносних деформацій у компонентах композитних конструкцій під час бістадійного виготовлення сталезалізобетонних перекриттів, що можуть бути застосовані для будівництва споруд цивільного захисту.

Основна частина дослідження. Як відомо, у сталезалізобетонних конструкціях перекриттів спільна робота монолітної залізобетонної плити зі сталевими несучими балками забезпечена в процесі їх двостадійного створення. Спочатку монтують сталеві балки, а потім влаштовують монолітну залізобетонну полицю. Бетонування монолітної полиці досить часто виконують по профільних листах, що є одночасно незнімною опалубкою та зовнішнім армуванням бетонної полиці (ліва схема на рис. 1). Профільні листи опалубки розкладають по верхньому поясу сталевих балок.

За такою технологією створення сталеві балки самостійно сприймають власну вагу щойно вкритої бетонної суміші і отримують початковий напружено-деформований стан. Бетон включається в роботу композитного перерізу, змінюючи його жорсткість, після набору міцності. На корисне навантаження працюватиме вже композитний переріз. За рахунок відмінності його жорсткості від жорсткості початкового перерізу напружено-деформований стан балок буде розвиватися вже за іншим законом, що викликатиме двокусово генетичну (родовідну) нелінійність. Цієї генетичної нелінійності можна уникнути шляхом встановлення тимчасових інвентарних стійок під сталеві балки перекриття на період бетонування монолітної полиці (права схема на рис. 1).

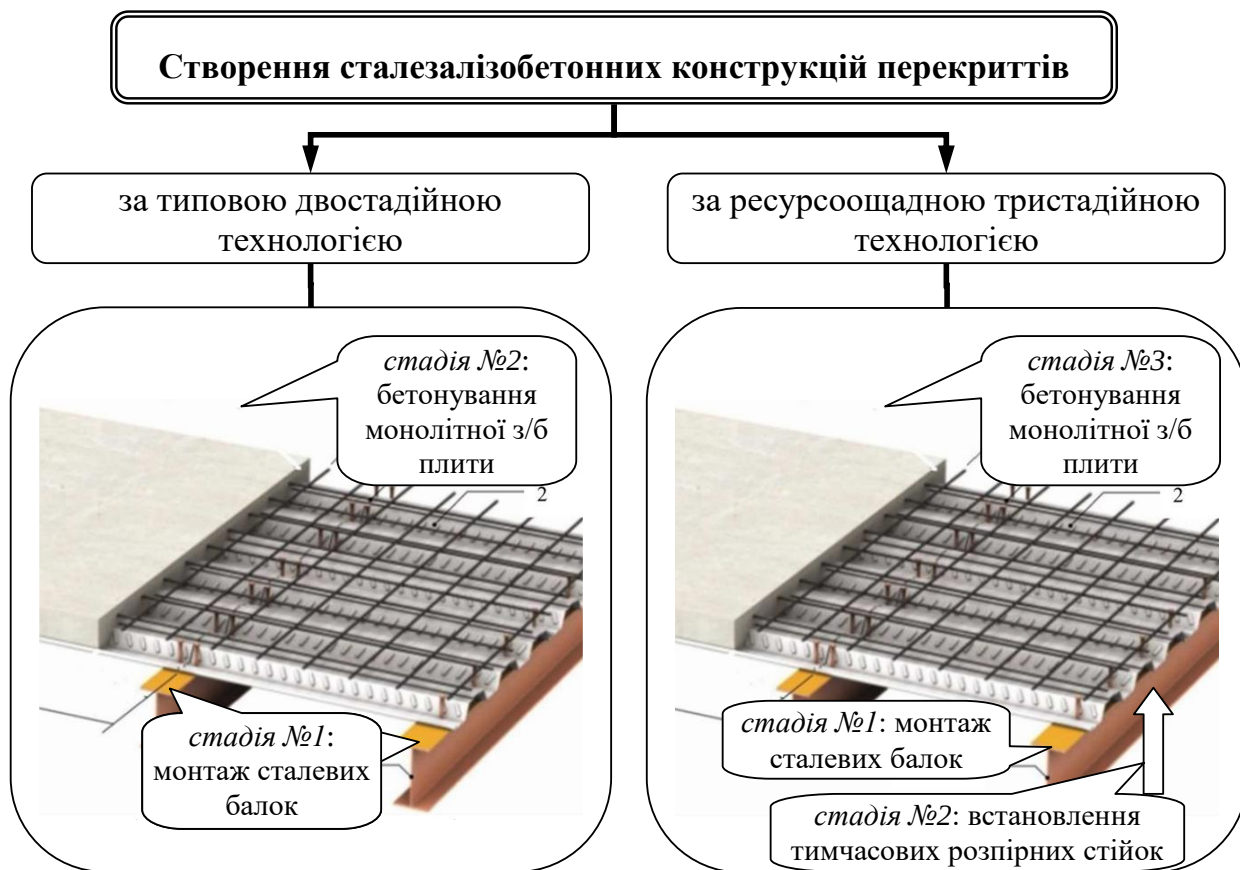


Рис. 1. Багатостадійна технологія створення сталезалізобетонних перекриттів

За типової технології виготовлення сталезалізобетонних перекриттів досить часто лише нижня частина перерізу сталевих несучих балок працюватиме на розтяг. Відповідно верхня частина сталевих балок працюватиме на стиск, що приводить до неефективного використання несучої здатності сталевих балок. Якщо попереднім натягом встановлених інвентарних стійок створити протилежний експлуатаційному вигин сталевих балок перекриття, буде досягнуто їхнє попереднє напруження. Тоді буде реалізовано вдаль використання фізико-механічних властивостей використаних матеріалів: зусилля стиску сприйматиме монолітний бетон, а зусилля розтягу – уся частина перерізу сталевих балок.

Для підтвердження описаних теоретичних викладок проведено

експериментальні дослідження на сталезалізобетонних балках довжиною 8700 мм, що склалися зі сталевих балок складеного перерізу (прокатний двотавр № 36 із підсиленою нижньою полицею смугою 12×100 мм) і залізобетонної монолітної плити товщиною 120 мм проектного класу міцності С16/20 (рис. 2, а). Коефіцієнт армування перерізу дорівнює 5,8 %. Вказані балки – несучі балки монолітного сталезалізобетонного перекриття житлової будівлі, влаштовані з кроком 3 м. Сталеві балки шарнірно спираліся на наявні залізобетонні колони будівлі. У розрахунках використана ефективна ширина монолітної залізобетонної полиці, визначена залежно від прогону сталевих балок і точок розташування нульових моментів вздовж осі балки на епюрі внутрішніх зусиль. Армування монолітної залізобетонної плити виконано двома арматурними сітками із

стрижнів Ø10 мм класу міцності А500С з кроком 200×200 мм. Сумісна робота сталевий двотаврової балки та монолітної залізобетонної плити забезпечена за

допомогою S-подібних анкерів довжиною 400 мм із стрижнів Ø12 мм класу А500С, приварених до верхньої полицки сталевих двотаврів із кроком 400 мм у два ряди.

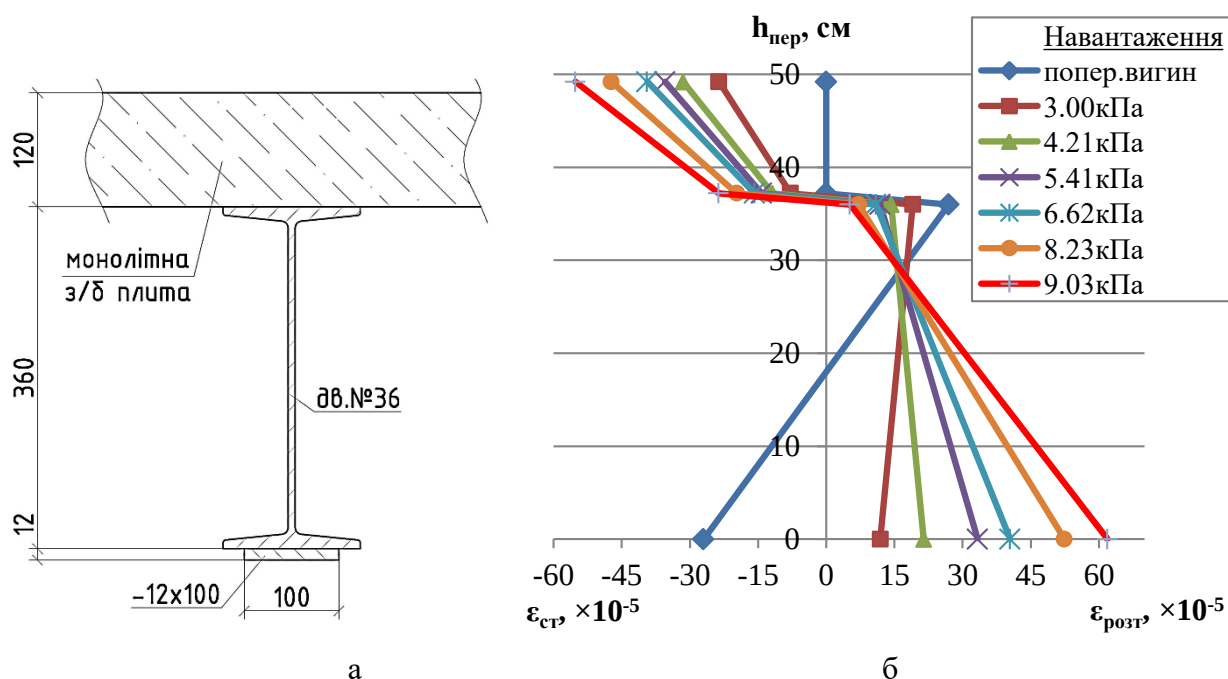


Рис. 2. Зміна відносних деформацій по висоті перерізу балки експериментально випробуваного СЗБ перекриття на кожному етапі навантаження:
а – поперечний переріз (конструкція) перекриття; б – зміна відносних деформацій

Попередні напруження сталевих балок експериментально досліджених сталезалізобетонних конструкцій створювали за допомогою тимчасових стійок опалубки (рис. 3), встановлених у натяг вздовж балки згідно з правою конструктивною схемою на рис. 1. Очікуваний вплив від попереднього напруження сталевих балок – зменшення прогинів перекриття і можливість зменшення поперечного перерізу самих сталевих балок.

Навантажували ділянку перекриття вантажем у вигляді газоблоків у шість етапів. Для вимірювання відносних деформацій сталезалізобетонного перекриття в зоні дії максимальних згинальних моментів (рис. 4) використо-

ували дрітні електротензорезистори 2ПКБ-20-200ХБ з базою 20 мм. Для контролю визначення деформацій використано тензометри Гугенберга з базою 20 мм (ціна поділки 5×10^{-5}).

На рис. 5 показано розвиток відносних деформацій, отриманих за результатами вимірювання опору електротензорезисторів, наклеєних у крайніх за висотою точках перерізу сталезалізобетонного перекриття, із збільшенням зовнішнього навантаження. Зміна відносних деформацій нижньої полицки двотавра балки, отримана за показаннями електротензорезистора Т1 і тензометра Гугенберга, має ідентичний характер (максимальна розбіжність склала 16,7 %, що пояснюють різною ціною

поділки вказаних вимірювальних приладів) і свідчить про достатню точність і якість вимірювань під час натурного експерименту.

На отриманому в результаті проведення експериментальних випробувань графіку зміни відносних деформацій за висотою перерізу

сталезалізобетонного перекриття на кожному етапі навантаження (рис. 2, б) спостерігали стрибок деформацій на межі верхньої полицьки сталевих двотавра та низу бетонної плити. Це ще раз доводить про різний початковий напружено-деформований стан шарів конструкції.



Рис. 3. Вигляд на СЗБ перекриття:
а – зверху; б – знизу зі встановленою інвентарною опалубкою

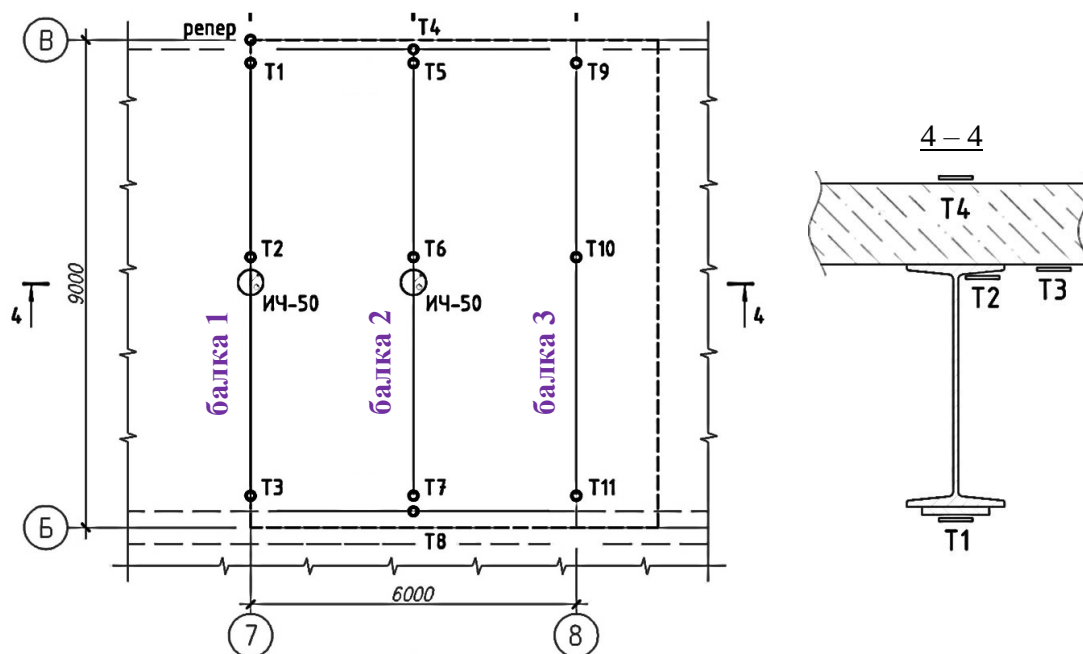


Рис. 4. Схема розміщення електротензорезисторів у перерізі СЗБ балок

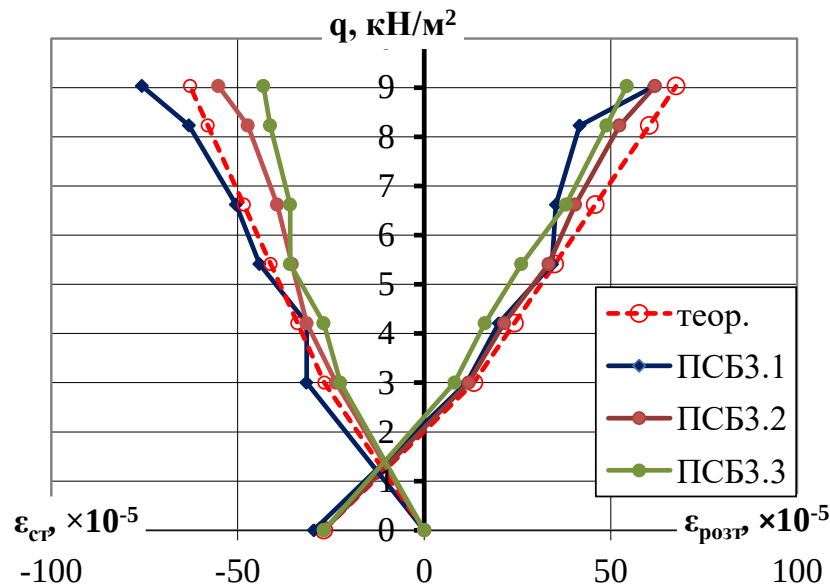


Рис. 5. Приріст відносних деформацій найбільш стиснутого та розтягнутого волокон перерізу сталезалізобетонних балок

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Розривність лінійного вигляду на межі верхньої полицки сталевих двотавра та низу бетонної плити діаграми відносних деформацій у поперечному перерізі сталезалізобетонних перекриттів можна пояснити бістадійною технологією його виготовлення: на першій стадії в більшості випадків влаштовують сталеві несучі балки, що самостійно сприймають вагу свіжо вкритої бетонної суміші, а на другому етапі сталезалізобетонне перекриття працює сумісно на експлуатаційне навантаження. Уникнути бістадійної роботи сталезалізобетонних перекриттів можна установленням на час бетонування монолітної плити тимчасових стійок під сталеві балки або влаштуванням

монолітної плити по інвентарній тимчасовій опалубці. Під час експериментального навантаження фрагмента сталезалізобетонного перекриття збільшення відносних деформацій за висотою поперечного перерізу з урахуванням попереднього вигину сталевих балок аналогічні тим, які були передбачені під час теоретичного аналізу напружено-деформованого стану таких балок. Урахування попереднього напруження сталевих балок дало змогу зменшити їхній переріз із прокатного двотавра № 45 на двотавр № 36 зі смугою по нижньому поясу, що зменшує витрати сталі на 11,1 %. Забезпечення сумісної роботи двотавра з монолітною залізобетонною плитою дало змогу зменшити переріз балок із двотавра № 50, що зменшує витрати сталі на 24,4 %.

Список використаних джерел

1. Філіпчук С. В., Налепа О. І., Голуб А. О., Баран Д. Я. Аналіз існуючих архітектурно-конструктивних рішень захисних фортифікаційних споруд. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне: НУВГтаП, 2023. Вип. 43. С. 228–237. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i43.25>.

2. Гасенко А. В., Новицький О. П., Пенц В. Ф. Реконструкція багатоповерхових промислових будівель під доступне житло із використанням ресурсозберувальних конструктивних рішень. *Зб. наук. праць Вісник НУВГП. Серія «Технічні науки»*. Рівне: НУВГтаП, 2021. Вип. 2(94). С. 27–40. <https://doi.org/10.31713/vt220214>.
3. Павліков А. М., Гарькава О. В. Розрахунок міцності нормальних перерізів балкових елементів за нелінійною деформаційною моделлю (на основі ДБН В. 2.6-98: 2009): навч. посіб. Полтава: ПолтНТУ, 2012. 85 с.
4. Su Y. Y. Gao X. L. Analytical model for adhesively bonded composite panel-flange joints based on the Timoshenko beam theory. *Composite Structures*. 2014. Vol. 107. P. 112–118.
5. Шмуклер В. С., Лучковський І. Я. Врахування повної діаграми «σ–ε» в алгоритмі розрахунку залізобетонних елементів. *Будівельні конструкції*. Київ: Будівельник, 2003. Вип. 59. С. 143–150.
6. Савицький М. В., Нікіфорова Т. Д., Фролов М. О. Напружено-деформований стан сталезалізобетонних конструкцій перекриття на етапі зведення споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. Дніпро: ПДАБА, 2021. № 3(003). С. 101–106. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.010721.101.772>.
7. Гасенко А. В. Огляд методів створення попередніх самонапружень у згинаних просторових сталезалізобетонних конструкціях. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне: НУВГтаП, 2022. Вип. 41. С. 110–118. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i41.12>.
8. Гасенко А. В., Кириченко В. А., Крупченко О. А. Чисельні дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних ребристих плит покриття. *Зб. наук. праць. Серія «Галузеве машинобудування, будівництво»*. Полтава: ПолтНТУ, 2013. Вип. 4(39). С. 78–83.

Семко Олександр Володимирович, доктор технічних наук, завідувач кафедри будівництва та цивільної інженерії, Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0002-2455-752X. Тел.: +38 (050) 305-09-70. E-mail: al.vl.semko@gmail.com.

Гасенко Антон Васильович, доктор технічних наук, професор кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0003-1045-8077. Тел.: +38 (050) 404-64-88. E-mail: gasentk@gmail.com.

Гасенко Ліна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, архітектури та дизайну, Херсонський державний аграрно-економічний університет. ORCID iD: 0000-0002-1310-914X. Тел.: +38 (095) 663-21-46. E-mail: lin02011@meta.ua.

Мудрий Іван Володимирович, студент групи 601-БП, Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Semko Oleksandr, Dr. Sc. (Tech.), Head of the Department of Construction and Civil Engineering of the Educational and Scientific, Institute of Architecture, Construction and Land Management, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0002-2455-752X. E-mail: al.vl.semko@gmail.com.

Hasenko Anton, Dr. Sc. (Tech.), Professor of the Department of Highways, Geodesy and Land Management of the Educational and Scientific, Institute of Architecture, Construction and Land Management, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0003-1045-8077. E-mail: gasentk@gmail.com.

Hasenko Lina, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Construction, Architecture and Design, Kherson State agrarian and economic University. ORCID iD: 0000-0002-1310-914X. E-mail: lin02011@meta.ua.

Mudryy Ivan, student group 601-BP of the Educational and Scientific Institute of Architecture, Construction and Land Management, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic».

Статтю прийнято 27.03.2025 р.

УДК 624.01:691.322

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ПОРИСТОСТІ НАПОВНЕНИХ ЦЕМЕНТНО-ПІЩАНИХ ЗРАЗКІВ ЗА КІНЕТИКОЮ ЇХ ВОДОПОГЛИНАННЯ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, асп. О. С. Зінченко

STUDY OF CHANGES IN THE POROSITY OF FILLED CEMENT-SAND SAMPLES BY THE KINETICS OF THEIR WATER ABSORPTION

Dr. Sc. (Tech.) L. Trykoz, postgrad. student O. Zinchenko

Анотація. У статті досліджено вплив наповнювачів на зміну пористості зразків цементно-піщаного розчину за кінетикою їх водопоглинання. Водопроникність таких матеріалів є функцією пористості й основним чинником, що забезпечує довговічність конструкцій і споруд із них. Як наповнювач використано дрібну фракцію подрібнення рециркульованого бетону. За кінетикою водопоглинання було оцінено такі параметри порової структури цементно-піщаного розчину: загальна пористість, відкрита і закрита пористість, показник середнього розміру відкритих капілярних пор. Експериментально встановлено, що заміна 40 % піску або 10 % цементу призводить до зміщення пористості зразків в область мікропор. Це підтверджено зменшенням показника середнього розміру пор удвічі, зменшенням загального об'єму пор і збільшенням кількості закритих пор, а також майже у три рази зменшенням відкритої пористості порівняно із закритою. На підставі отриманих даних зроблено висновок про ефективність застосування певної кількості наповнювача для зниження пористості і водопоглинання наповнених цементно-піщаних зразків.

Ключові слова: цементно-піщаний розчин, пористість, водопоглинання, рециклінговий наповнювач.

Abstract. The article deals the effect of fillers on the change in the porosity of cement-sand mortar samples based on the kinetics of their water absorption. Kinetics of water absorption of cement-sand samples is a research method that simulates the operation of concrete structures under real operating conditions. The water permeability of such materials is a function of porosity and the main factor that ensures the durability of structures and buildings. The following parameters of the pore structure of the cement-sand mortar were evaluated according to the kinetics of water absorption: total porosity, open and closed porosity, and the average size of open capillary pores. As a filler, a fine fraction of crushed recycled concrete sleepers was used. The results showed a change in the ratio of total, open and closed porosity, as well as the average size of open capillary pores. The ratio of open porosity to closed porosity is 2.95, i.e. open porosity is almost three times bigger than closed porosity for the unfilled sample. For filled samples, this ratio fluctuates within 2.1...0.98 and indicates that the number of closed pores increases due to the number of open ones. The biggest water absorption is demonstrated by samples with the biggest percentage of sand or cement replacement – 15.6 % and 11.4 %, respectively. This is because of both the overall loose structure due to the non-optimal arrangement of sand, cement and filler particles and the increased porosity of the filler itself. The smallest water absorption from 9.2 % to 8.4 % is found in filled samples. Consequently, the densest particle packing is achieved for these samples, which reduces water absorption even when using porous fillers. It was experimentally established that replacing 40 % of

sand or 10 % of cement leads to a shift in the porosity of samples to the area of micropores. This has been confirmed by a twofold decrease in the average size, a decrease in the volume of total pores and an increase in the number of closed pores, as well as an almost threefold decrease in open porosity compared to closed porosity. Under these conditions, free movement of water from outside concrete structures into concrete is difficult. In turn, this rises the durability. Further studies will be aimed at determining the change in porosity of cement-sand samples over time to confirm the hypothesis of a self-compacting mechanism due to the slow release of water in the pores of secondary aggregates.

Keywords: cement-sand mortar, porosity, water absorption, recycled filler.

Вступ. Для промислового та цивільного будівництва характерне широкий спектр використовуваних конструкцій і споруд і різноманітність умов їх експлуатації, що визначено кліматом, особливостями технічних рішень, умовами навантаження та ін. Особливо складні умови для конструкцій, що зазнають безпосереднього атмосферного впливу. Контакт з агресивними середовищами призводить до руйнації конструкцій. Причому для таких конструкцій характерний комплексний вплив чинників, наприклад одночасно вологості та температури, ґрунтових вод, електричного струму. Отже, актуальним завданням є покращення непроникності матеріалу насамперед для води, оскільки саме вона визначає можливість розвитку корозійних процесів.

Властивості будівельних матеріалів визначені їхніми складом і будовою, а також величиною та характером пористості. Пористість є важливою характеристикою, оскільки з нею пов'язані такі технічні властивості матеріалу, як міцність, щільність, водопоглинання, морозостійкість, електропровідність, теплопровідність тощо. Пористому матеріалу, наприклад бетону, властиві загальна, відкрита і замкнута пористість, розподіл пор за їхнім радіусом, показниками середнього розміру та однорідністю розмірів відкритих капілярних пор [1]. Загальну пористість P визначають як відношення об'єму пор до об'єму матеріалу. Під відкритою пористістю P_0 розуміють об'єм усіх пор матеріалу, сполучених між собою і з навколишнім середовищем. Відкриті пори заповнені водою у звичайних умовах

насичення, збільшують водопроникність і водопоглинання матеріалу, погіршують його морозостійкість. Решта об'єму пор характеризує замкнуту пористість (капілярну, гелеву). Збільшення замкритої пористості за рахунок відкритої підвищує довговічність матеріалів і виробів. Вплинути на співвідношення замкритої і відкритої пористості можна з ущільненням бетонної суміші та/або введенням різних наповнювачів. Такими наповнювачами можуть бути подрібнені залишки бетонних конструкцій, значна маса яких продовжує накопичуватися, створюючи великі звалища. У попередніх дослідженнях авторів [2, 3] показано, що зміна властивостей цементно-піщаних розчинів, насамперед середньої густини і міцності, з введенням таких наповнювачів відбувається циклічно зі збільшенням кількості заміщеного піску або цементу. Але залишилося нез'ясованим, як відсоток заміщення впливає на розподіл пористості в таких зразках, оскільки це напряму впливає на водопоглинання і довговічність вказаних матеріалів.

Аналіз попередніх досліджень. Розподіл пор за розмірами є важливим чинником, що впливає на дифузію вологи та проникність матеріалів на основі цементу. Раніше вважалося, що обсягом мезопор (діаметр $100 \text{ нм} \div 0,01 \text{ мм}$) і макропор (діаметр $0,01 \text{ мм} \div 1 \text{ см}$) можна знехтувати порівняно з об'ємом мікропор (діаметр $< 100 \text{ нм}$). Розподіл за розмірами мікропор розглянуто в роботі [4] як пояснення адсорбції вологи. Використовуючи ізотерми адсорбції, оцінено розподіл розмірів мікропор. Також

мезопори та макропори враховані для моделювання проблем міцності, пов'язаних, наприклад, із замерзанням-відтаванням, водопроникністю і усадкою з висиханням. У роботі [5] встановлено відмінність механічних властивостей залежно від обсягу гелевих пор. Так, гелева пористість від 12,4 до 27 % визначає пластичні властивості, а крихкі властивості визначає пористість нижче 12,4 % або вище 27 %. Зокрема, розрахунки в роботі [5] показують, що 20 % гелевої пористості дає кращу структурну стійкість і більш високу жорсткість. Значний інтерес становить дослідження змін відкритої пористості цементних паст залежно від водоцементного відношення (В/Ц). У роботі [6] досліджені мікропористість методом ртутної порометрії і макропористість за водопоглинанням. Встановлено, що збільшення В/Ц від 0,3 до 0,6 збільшує мікропористість з 10 до 30 %, а макропористість – з 30 до 45 %. Збільшення В/Ц від 0,3 до 0,6 збільшує обсяг пор розміром 100 нм і зменшує обсяг пор розмірами 50 нм. Збільшення пористості призвело до збільшення газопроникності вчетверо, що знижує довговічність конструкцій із такого матеріалу. Такі самі дані про вплив В/Ц на співвідношення мікро- і макропористості отримано в роботі [7].

В умовах агресивного навколишнього середовища довговічність бетону із вторинними заповнювачами є одним із найважливіших аспектів, які розглядають дослідники. Метою статті [8] було дослідження впливу різних співвідношень заповнювачів (переробленого крупного та дрібного) на механічні характеристики та довговічність бетону. Було вивчено п'ять серій бетонних сумішей, виготовлених із різними поєднаннями зерен (натуральні/перероблені). За отриманими результатами, капілярне водопоглинання бетонної суміші, виробленої з повною заміною природних заповнювачів на рециркульовані, показало значно вищі

результати, ніж інші бетони. Це пояснено тим, що вільна вода, використовувана не для гідратації цементу, а лише для виготовлення придатного для роботи бетону, сприяла створенню більшої системи капілярних пор. Крім того, результати показують, що відкрита пористість збільшилася для сумішей, що містять крупний рециклінговий заповнювач, і ще більше з використанням дрібного рециклінгового заповнювача. Для цих двох бетонних сумішей результати випробувань відкритої пористості були на 42 і 64 % вищими, ніж у стандартного бетону, відповідно. Отже, доступна для води пористість безпосередньо пов'язана з пористістю заповнювачів і використанням співвідношенням В/Ц, що призводить до більш пористої мікроструктури. У роботі [9] кількісно визначали основні елементи пористої структури бетонних розчинів як на природних, так і дрібних вторинних заповнювачах, а саме капілярну пористість, гелеву пористість і загальну пористість. Для цементно-піщаного розчину на натуральному піску гелева пористість дорівнює 27,96 %, капілярна – 13 %, загальна – 25,86 %, у той час як за використання рециркульованого піску ці значення становлять відповідно 29,51, 17, 38,84 %. На пористість гелю C–S–H припадає 56 % загальної пористості бетону з дрібного переробленого заповнювача, що свідчить про те, що методи покращення бетону з дрібного вторинного заповнювача мають бути спрямовані на зменшення пористості гелю C–S–H.

Безліч робіт зі збільшення міцності та довговічності матеріалів присвячено введенню дрібних наповнювачів, що знижують загальну пористість, наприклад, у дослідженні [10] порівнюють зміни пористості за рахунок введення як неорганічних наповнювачів, так і суперпластифікатора. Як наповнювачі використовували вапняний порошок, золу виносення та кремнезем. Виявилося, що пористість із часом зменшується на майже

однакову величину незалежно від виду добавки. Вимірюванням електричної провідності встановлено, що у випадку неорганічних заповнювачів має місце механічне заповнення дрібних пор. Застосування суперпластифікатора зменшує кількість вільної води в порах, що перешкоджає перенесенню електричного заряду. У деяких випадках модифікатор добавки більш впливає на пористість, ніж сама добавка, як було показано в роботі [11]. Мікроструктурні зміни, оцінювані азотною порометрією, показали, що розподіл пор за розмірами і особливо мікро- і мезопор гелевої структури, набагато більше залежить від типу модифікатора, ніж модифікованої добавки. Діаметр і кількість пор сумішей на основі рециркульованих заповнювачів досліджено в роботі [12]. Встановлено, що пористість і середній діаметр пор звичайної пасти становлять 26,7 % і 24,4 нм. З додаванням 30 % мелених відходів цементної пасти, 30 % мелених відходів цементно-піщаного розчину або 30 % мелених відходів бетону пористість становила 33,8, 35,1 і 36,2 %, а середній діаметр пор таких зразків дорівнював 28,4, 28,3 і 28,5 нм відповідно. Для зменшення пористості автори використовували такі мінеральні добавки, як подрібнена цегла, зола винесення, метаколін і кремнезем. Найбільш значне зменшення пористості і діаметра пор продемонстрували зразки з кремнеземом, у яких пористість зменшилась до 27,3 %, а середній діаметр пор – до 16,5 нм. Автори пояснюють це пуцолановою активністю добавок, що призводить до зменшення діаметра пор всередині пасти. Схожі результати отримані в роботі [13], де встановлено, що 12 % нанокремнезему призводить до збільшення на 30,8 % щільності гідросилікатного гелю, зниження його пористості на 16,7 % і зниження загальної пористості на 24,4 %.

Вплив умов затвердіння на пористість досліджували в роботі [14]. Витримка зразків цементно-піщаного розчину у воді протягом семи днів або термічна обробка

зменшує пористість зразків на кілька відсотків, з витримкою протягом 28 діб досягнуте зменшення пористості становило 5 %. Ці результати свідчать про те, що пуцоланову активність мають залишки старого цементно-піщаного розчину, який потрапляє разом із рециклінговими дрібними заповнювачами. На відміну від цих даних, автори роботи [15] наводять результати дослідження пористості бетону на вторинних заповнювачах, яка збільшується зі збільшенням кількості заміни природних заповнювачів, але зменшується з часом твердіння. Автори також спостерігали неочікуваний ефект зменшення проникнення агресивних хлорид-іонів у бетон за достатньо великого значення пористості. Така поведінка може бути пов'язана з низкою ймовірних механізмів, що діють незалежно або в синергетичній манері, наприклад утворення первинної та вторинної контактної зони та/або швидке утворення оболонки під час цементування, гідратація завдяки високій дрібності цементу і внутрішній механізм затвердіння, активований у сумішах, що містять перероблені заповнювачі. Отже, можливий механізм підвищення міцності бетону на вторинних заповнювачах може бути таким: зайва сорбована волога в пористих повторно використаних заповнювачах із часом дифундує до негідратованих зерен як нового цементу, так і старого, спричиняючи їхні гідратацію, твердіння і ущільнення структури. Підтвердження цього механізму потребуватиме подальших досліджень. Ця робота сфокусована на вивченні пористості зразків цементно-піщаного розчину з різним відсотком використання дрібної фракції помелу залишків залізобетонних залізничних шпал.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вивчення пористості зразків цементно-піщаного розчину з різним відсотком використання дрібної фракції помелу залишків залізобетонних залізничних шпал. Для досягнення мети поставлено

такі завдання: отримати дрібний заповнювач шляхом подрібнення і розсіву відходів шпал; виготовити зразки цементно-піщаного розчину з різним вмістом дрібної фракції; визначити водопоглинання зразків із часом; розрахувати показники пористості зразків.

Матеріали і методи дослідження.

Для дослідження змін пористості з введенням наповнювачів були виготовлені

зразки-балочки розміром 40×40×160 мм із суміші портландцементу, піску і води, у яких частину піску або цементу замінили пилюватою фракцією подрібнених шпальних відходів. Пісок заміщували наповнювачем, який пройшов крізь сито з розмірами чарунки 0,14 мм, цемент – із розмірами 0,09 мм. Співвідношення компонентів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Співвідношення компонентів у серіях зразків

Номер серії зразків	Витрати компонентів, кг/м ³					Вода/Цемент*
	Цемент	Пісок	Вода	Наповнювач (розмір зерен < 0,14 мм)	Наповнювач (розмір зерен < 0,09 мм)	
1	650	1950	260	-	-	0,5
2	650	1560	300	390	-	0,5
3	650	1170	340	780	-	0,5
4	650	975	360	975	-	0,5
5	650	780	380	1170	-	0,5
6	650	390	420	1560	-	0,5
7	650	-	460	1950	-	0,5
8	585	1950		-	65	0,5
9	520	1950		-	130	0,5
10	455	1950		-	195	0,5
11	390	1950		-	260	0,5
12	325	1950		-	325	0,5

Примітка. * Водно-цементне відношення вказано без урахування додаткової кількості води на змочування і поглинання пористими наповнювачами.

Після твердіння за нормальних умов протягом 28 діб зразки кожної серії висушували за температури 105±5 °С з періодичним зважуванням кожні 24 години до моменту, поки в разі двох послідовних зважувань маса зразка відрізнятиметься не більш ніж на 0,1 %. Потім зразки поміщали в ємність із водою так, щоб рівень води в ній був вище за верхній рівень зразків на 50 мм. Температура води в ємності була 20±2 °С. Водопоглинання кожного зразка за масою W_m , %, визначали з похибкою до 0,1 % за формулою [1]

$$W_m = \frac{m_b - m_c}{m_c} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де m_b – маса водонасиченого зразка, г;
 m_c – маса сухого зразка, г.

Водопоглинання кожного зразка за об'ємом W_o , %, визначали з похибкою до 0,1 % за формулою [1]

$$W_o = \frac{W_m \cdot \rho_0}{\rho_b}, \quad (2)$$

де W_m – водопоглинання окремого зразка за масою, %;

ρ_0 – середня густина сухого зразка, кг/м^3 ;

ρ_v – середня густина води, прийнято 1000 кг/м^3 .

Вологість серії зразків визначали як середнє арифметичне значення результатів визначення вологості окремих зразків.

Для визначення параметрів порової структури цементно-піщаного розчину з наповнювачами використовували метод дослідження кінетики поглинання води, що дає змогу визначити показник середнього розміру та однорідності розмірів капілярних пор. Криві водопоглинання виражені рівнянням [1]

$$W_t = W_{\max} \left[1 - e^{-(\bar{\lambda} t)^\alpha} \right], \quad (3)$$

де W_t – водопоглинання зразка за час t за масою, %;

$W_{\max}$ – повне водопоглинання зразка за масою, %;

e – основа натурального логарифма;

t – час водопоглинання, год;

$\bar{\lambda}$ – показник середнього розміру відкритих капілярних пор, який дорівнює границі відношення прискорення процесу водопоглинання до його швидкості і визначений за номограмами [1];

α – показник однорідності розмірів відкритих капілярних пор, визначений за номограмами [1].

Для отримання кривих водопоглинання зважували зразки через 0,5 та 1 годину після занурення висушеного зразка у воду, а потім кожні 24 години до постійної маси. За результатами випробувань розраховують відносне водопоглинання масою в моменти часу $t_1 = 0,25$ і $t_2 = 1$ год. За цими величинами згідно з роботою [1]

визначають параметри $\bar{\lambda}$ та α .

Основна частина досліджень. На рис. 1 зображені криві водопоглинання серій зразків згідно з табл. 1. Криві мають плавний характер експоненційного типу, апроксимовані трипараметричною експоненційною функцією (3). Для більшої наочності криві для зразків із заміною піску і цементу наведені окремо (рис. 1, а і б).

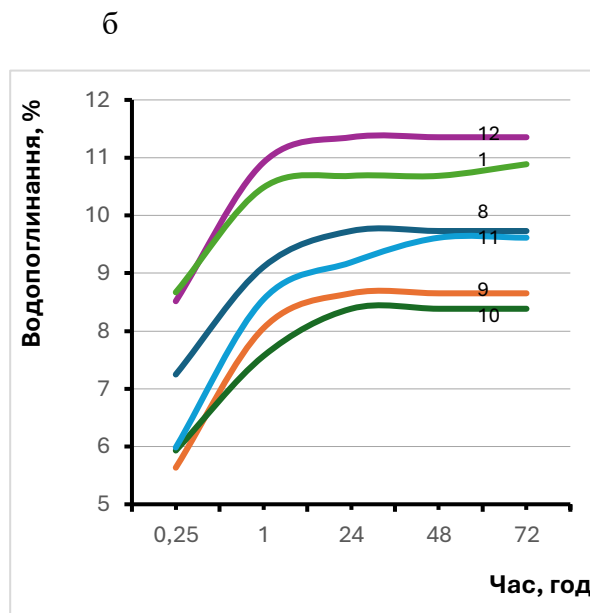
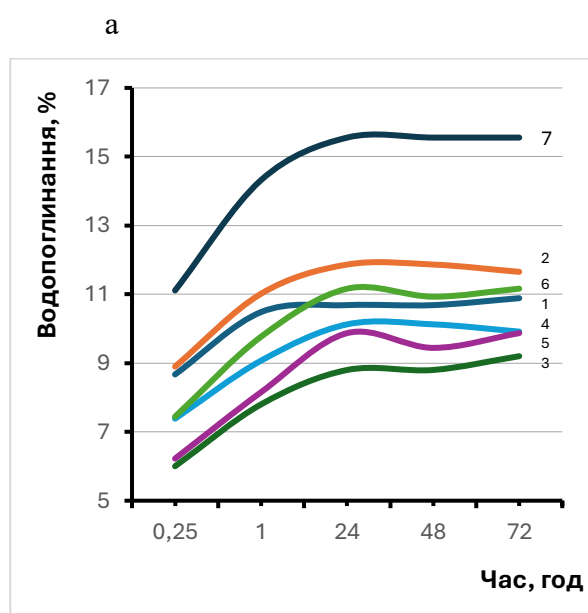


Рис. 1. Криві кінетики водопоглинання серій зразків із заміною піску (а) і заміною цементу (б). Номери поруч із кривими відповідають номерам серій у табл. 1

Як свідчать результати на рис. 1, найбільше водопоглинання мають зразки з найбільшим відсотком заміни піску або цементу – 15,6 і 11,4 % (відповідно серії 7 і 12). Це пов'язано як із загальною нещільною структурою за рахунок неоптимального розташування частинок піску, цементу і наповнювача, так і підвищеною пористістю самого наповнювача. Найменше водопоглинання мають зразки серій 3 і 10 (відповідно 9,2 і 8,4 %). Отже, для цих зразків досягнуто найбільш щільне пакування частинок, що зменшує водопоглинання навіть із використанням пористих наповнювачів.

Виконаємо розрахунок параметрів рівняння (3) згідно з роботою [1] і визначимо зміну закритої пористості зі збільшенням кількості наповнювача.

Загальну пористість матеріалу P визначали за значеннями істинної густини речовини ρ_0 та середньої густини матеріалу ρ , використовуючи співвідношення [1]

$$P = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Відкриту пористість матеріалу визначали з міркувань, що об'єм відкритих капілярних пор P_0 у зразках дорівнює об'ємному водопоглинанню, що визначено формулою (2). Закриту пористість визначають як різницю цих величин:

$$P_z = P - P_0. \quad (5)$$

Результати розрахунків зведено в табл. 2 та 3, а також подано на рис. 2.

Таблиця 2

Розрахунок параметрів експоненційних кривих

Номер серії	$W_{\max}, \%$	$W_{t2}, \%$	$W_{t2}/W_{\max}$	$W_{t1}, \%$	$W_{t1}/W_{\max}$	$\bar{\lambda}_1$	α
1	10,89	10,48	0,96	8,67	0,80	3,15	0,50
2	11,65	11,02	0,95	8,90	0,76	3,00	0,55
3	9,20	7,80	0,85	6,00	0,65	1,90	0,42
4	9,92	9,07	0,91	7,38	0,74	2,35	0,40
5	9,87	8,15	0,83	6,22	0,63	1,75	0,40
6	11,16	9,77	0,88	7,44	0,67	2,10	0,48
7	15,56	14,32	0,92	11,11	0,71	2,50	0,50
8	9,73	9,11	0,94	9,73	0,74	2,51	0,45
9	8,65	8,05	0,93	8,65	0,65	2,60	0,65
10	8,38	7,57	0,90	8,38	0,71	2,25	0,42
11	9,62	8,55	0,89	9,62	0,62	2,20	0,60
12	11,35	10,92	0,96	11,35	0,75	3,00	0,53

Таблиця 3

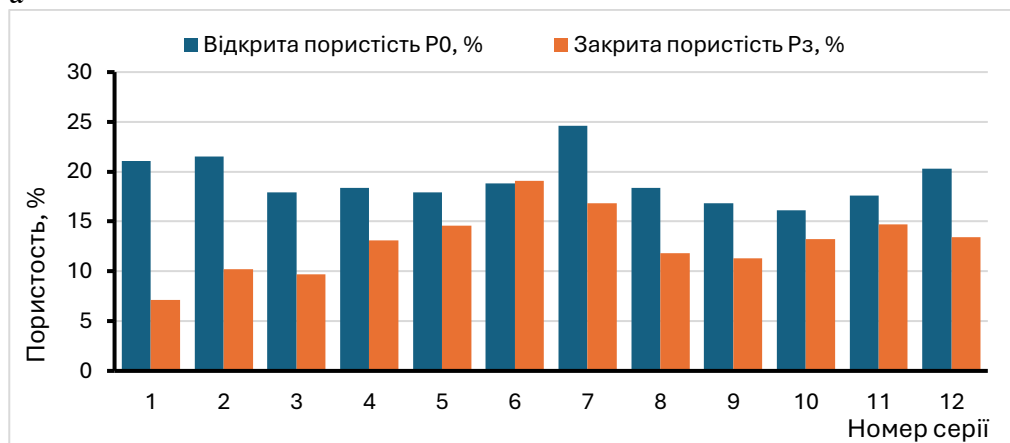
Розрахунок пористості серій зразків

Номер серії	Середня густина $\rho_0, \text{кг/м}^3$	Загальна пористість $P, \%$	Відкрита пористість $P_0, \%$	Закрита пористість $P_z, \%$	Показник середнього розміру відкритих капілярних пор $\bar{\lambda}$
1	2	3	4	5	6
1	1937,5	28,2	21,1	7,1	9,2
2	1843,8	31,7	21,5	10,2	7,2

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6
3	1953,1	27,7	17,9	9,7	4,5
4	1851,6	31,4	18,4	13,1	8,3
5	1820,3	32,6	17,9	14,6	4,0
6	1679,7	37,8	18,8	19,1	4,6
7	1582,1	41,4	24,6	16,8	6,3
8	1886,7	30,1	18,4	11,8	7,8
9	1941,4	28,1	16,8	11,3	4,8
10	1910,2	29,2	16,1	13,2	6,8
11	1828,1	32,3	17,6	14,7	4,2
12	1789,1	33,7	20,3	13,4	8,2

а



б



Рис. 2. Значення закритої, відкритої (а) і загальної пористості і показника середнього розміру відкритих капілярних пор $\bar{l}$ (б) для серій зразків

Аналізуючи діаграми на рис. 2, а бачимо, що співвідношення відкритої та закритої пористості відрізняється для зразків із заміною цементу і заміною піску. Значення відкритої пористості найменше для серій 9 і 10. Закрита пористість спочатку зростає від серії 1 до серії 6, а потім знов зменшується для тих самих зразків серій 9 і 10. Співвідношення відкритої та закритої пористості для ненаповненого зразка (серія 1) становить 2,95, тобто відкрита пористість майже втричі більша за закриту. Для наповнених зразків це співвідношення коливається в межах 2,1...0,98 і свідчить про збільшення кількості закритих пор за рахунок кількості відкритих. З точки зору довговічності найкраще співвідношення загальної, відкритої та закритої пористості мають зразки серії 10 – цей склад має найменшу загальну і відкриту пористість, що запобігає проникненню води ззовні, і

майже таку саму величину закритої пористості, що збільшує морозостійкість і довговічність матеріалу такого складу. За рис. 2, б, добавка наповнювачів сильно впливає на показник середнього розміру відкритих капілярних пор, найменше значення якого демонструють зразки серій 5 і 11, що означає найменше адсорбційне поглинання вологи з повітря матеріалом такого складу. Найбільшу загальну пористість, як і відкриту, мають зразки серій 6 і 7. Фото зразків на рис. 3 також підтверджують цей висновок. Отже, додавання наповнювачів замість цементу або піску за певного співвідношення компонентів призводить до зниження капілярних пор у зразках з добавками, що позитивно вплине на такі характеристики, як водопроникність, морозостійкість, солестійкість.

а



б



Рис. 3. Фото перерізів зразків із заміною 40 % піску (а) і 10 % цементу (б)

Висновки. Кінетика водопоглинання цементно-піщаних зразків є методом дослідження, що моделює роботу бетонних споруд у реальних умовах експлуатації. Вологе середовище призводить до розвитку деструктивних процесів у бетоні. За рахунок використання наповнювачів, які є подрібненими відходами залізобетонних шпал, досягнуто регулювання структури цементно-піщаних зразків, що проявилось у

зміні співвідношення загальної, відкритої та закритої пористості, а також показника середнього розміру відкритих капілярних пор. Експериментально встановлено, що заміна 40 % піску або 10 % цементу призводить до зміщення пористості зразків в область мікропор, про що свідчить зменшення вдвічі показника середнього розміру, зменшення обсягу загальних пор і збільшення кількості закритих пор, а також

майже втричі зменшення відкритої пористості порівняно із закритою. У цих умовах вільне переміщення води зовні бетонних конструкцій усередину бетону ускладнено, що підвищує його довговічність. Наступні дослідження будуть

спрямовані на з'ясування зміни пористості цементно-піщаних зразків із часом для підтвердження гіпотези про механізм самоущільнення за рахунок повільного вивільнення води в порах вторинних заповнювачів.

Список використаних джерел

1. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 38 с.
2. Дослідження міцності і деформацій композиційних матеріалів на основі наповнених полімерів / Л. В. Трикоз, С. М. Камчатна, О. С. Зінченко та ін. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2024. № 8. С. 72-79. URL: <http://dx.doi.org/10.31650/2786-6696-2024-8-72-79> (in English).
3. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В. Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів. *Науковий вісник будівництва*. 2024. Вип. 111. С. 135-141. URL: <http://dx.doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.17>.
4. Gong F., Zhang D., Sicut E., Ueda T. Empirical Estimation of Pore Size Distribution in Cement, Mortar, and Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014. Vol. 26. No. 7. P. 04014023. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000945](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000945).
5. Sekkal W., Zaoui A., Benzerzour M., Abriak N. Role of porosity on the stiffness and stability of surface of the nanogranular C–S–H gel. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 87. P. 45-52. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.04.014>.
6. Tracz T. Open porosity of cement pastes and their gas permeability. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2016. Vol. 64. No. 4. P. 775-783. URL: <http://dx.doi.org/10.1515/bpasts-2016-0086>.
7. Kurumisawa K., Nawa T. Electric conductivity and chloride ingress in hardened cement paste. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2016. Vol. 14. P. 87-94. URL: <http://dx.doi.org/10.315/jact.14.87>.
8. Berredjem L., Arabi N., Molez L. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 246. P. 118421 URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>.
9. Akono A.-T., Zhan M., Chen J., Shah S. P. Nanostructure of calcium-silicate-hydrates in fine recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 115. P. 103827. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103827>.
10. Sanish K. B., Neithalath N., Santhanam M. Monitoring the evolution of material structure in cement pastes and concretes using electrical property measurements. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 49. P. 288-297. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.038>.
11. Kalpokaitė-Dičkuvienė R., Lukošiuūtė I., Čėsniienė J., Brinkienė K., Baltušnikas A. Cement substitution by organoclay – The role of organoclay type. *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 62. P. 90-96. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.021>.
12. Ma Z., Zhang Z., Hu R., Liu X., Shen J., Wang C. Chloride resistance and improvement of fully recycled cementitious materials with both recycled aggregate and recycled powder. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2252458>.

13. Buettner N., Iyacu G., Akono A.-T. Colloidal nanosilica promotes high-density calcium-silicate-hydrates in fine recycled concrete aggregate mortar. *Cement and Concrete Research*. 2024. Vol. 180. P. 107498. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107498>.

14. Akgul Ü. M., Akgul M. Effect of curing conditions on cement based self-compacting mortar produced with mortar waste aggregate. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. No. 16. P. e36423. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36423>.

15. Oikonomopoulou K., Ioannou S., Savva P., Spanou M., Nicolaides D., Petrou M. F. Effect of Mechanically Treated Recycled Aggregates on the Long Term Mechanical Properties and Durability of Concrete. *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 2871. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15082871>.

Трикоз Людмила Вікторівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net. ORCID 0000-0002-8531-7546.

Зінченко Олексій Сергійович, аспірант 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.

Trykoz Liudmyla, DSc, professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net. ORCID 0000-0002-8531-7546. 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 27.03.2025 р.

УДК 621.56:697.1:620.91(477)

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ УКРАЇНИ

Асп. М. С. Корчагін

IMPROVING THE EFFICIENCY OF HEAT PUMPS FOR THE CLIMATIC CONDITIONS OF UKRAINE

Postgraduate student M. S. Korchahin

Анотація. У статті проведено аналіз температурних режимів роботи сучасної теплонасосної техніки. Виконано порівняння температурних режимів роботи сучасних теплових насосів з температурними графіками роботи систем опалення різного типу. Сформульовано шляхи розширення температурного діапазону роботи теплових насосів. Запропоновано модифікацію конструкції теплового насосу з метою використання стандартних акумуляторів тепла/холоду з фазовим переходом «вода – крига».

Ключові слова: акумулятор тепла, компресор, система опалення, тепловий насос, теплоносії, фазовий перехід, холодоагент.

Abstract. *The article analyzes the temperature modes of operation of modern heat pump equipment.*

The temperature range of the outside air, at which heat pumps of the most common classes work effectively, is limited. It is important to modernize the design of heat pump equipment in order to expand the limits of its application. Air-to-water heat pumps are most suitable for use as heat sources for heating residential, office and administrative buildings. At the same time, the energy efficiency class of buildings must not be lower than "C".

The amplitude of outdoor air temperatures in the cold period of the year goes beyond the operational capabilities of standard models, limiting their effectiveness.

In order to increase the energy and economic attractiveness of the use of heat pumps in heating systems, it is necessary to expand the temperature limits of their use. The temperature mode of operation of heat pumps must correspond to the temperature schedule of the heating system. To do this, it is proposed to reduce the temperature difference of freon and air, increase the amount of air passing through the installation, and use intermediate vapor injection technologies and smooth inverter control technology to increase the cooling coefficient. In addition, the possibility of using a heat/cold accumulator based on the "water-ice" phase transition is considered to provide low-temperature heat during periods when the external temperature exceeds the temperature limits of the heat pump operation.

A correlation of the temperature capabilities of modern heat pump technology with the requirements for the temperature parameters of the coolant of various types of heating systems was obtained. It is shown that there are quite noticeable restrictions on the use of one or another compressor-type heat pump in relation to the type of devices used in heating systems.

Formulated measures with the help of which it is possible to expand the temperature range of operation of heat pumps.

A modification of the heat pump design is proposed in order to use standard heat/cold accumulators with a phase transition

Keywords: *heat accumulator, compressor, heating system, heat pump, coolant, phase transition, refrigerant*

Вступ. Теплові насоси різноманітних класів та потужностей отримали значне розповсюдження в Україні та інших країнах світу [1]. Вони використовуються у найрізноманітніших сферах діяльності людини – від побутових потреб до забезпечення потреб сільського господарства і промислового виробництва [2]. Наймасовіший приклад застосування теплових насосів – це побутові спліт-системи кондиціонування повітря (кондиціонери). На відміну від попередніх часів, коли випускалися моделі, що працювали тільки на охолодження або дворежимні моделі (охолодження/тепловий насос), на сьогодні вони майже на 100 % випускаються всіма відомими світовими виробниками у версії тільки з тепловим насосом. Існує широкий вибір інших

теплових насосів для використання у самих різних галузях промисловості та житлово-комунального господарства.

Діапазон температури зовнішнього повітря, за якого використовується найбільш вживані моделі теплонасосного обладнання, обмежений, тому важливим є модернізація конструктивного рішення обладнання з метою розширення меж його застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Спектр теплонасосної техніки досить великий [3], тому треба окреслити деякі умови використання теплових насосів у тій чи іншій сфері.

З огляду на сучасну ситуацію в Україні з економічної точки зору одним з наймасовіших сегментів, де можуть застосовуватися теплові насоси, є

використання їх як джерел тепла для систем опалення різноманітних будівель – житла, офісних чи адміністративних. Зі свого боку, з чотирьох основних типів теплових насосів за джерелами тепла («повітря – повітря», «повітря – вода», «вода – вода» та «вода – повітря») у переважній кількості випадків для такого типу будинків найбільше будуть підходити системи з джерелом низькопотенційного тепла «повітря» та приймачем тепла «вода», тобто системи «повітря – вода» [4]. Повітря, як джерело низькопотенційного тепла, досить просте у застосуванні та не потребує ніяких додаткових технічних систем щоб його використовувати.

Низькопотенційне джерело «вода», по-перше, має досить умовну назву, яка містить у собі будь-які рідинні теплоносії, а по-друге, майже усі системи, що класифікуються як «грунтові» (по типу низькопотенційного джерела тепла) входять у цю групу, бо тепло від ґрунту до теплонасосної системи переноситься все одно теплоносієм. У сучасних містах з досить щільною забудовою, з великою кількістю комунікацій складно знайти умови для надійного застосування теплових насосів з низькопотенційним джерелом «грунт», або «вода» [5]. На практиці таких систем мало і перспектив їхнього розвитку не передбачається. Хоча такі системи при виробництві тепла майже не залежать від температури зовнішнього повітря та мають стабільні теплові характеристики, досить часто з різних причин деградує з часом за здібностями низькопотенційного джерела тепла віддавати тепло. Повітря, як джерело низькопотенційного тепла, не має таких проблем з деградацією, але має іншу проблему, для постійної стабільної роботи теплонасосного обладнання як джерела тепла для будівлі – амплітуда температури зовнішнього повітря в опалювальний період в Україні (яка становить більше 30 °C за опалювальний період) досить велика [6, 7]. Деякі піки цих температур зовнішнього повітря виходять за експлуатаційні

спроможності умовно «стандартних» теплових насосів, які масово випускає світова промисловість. Цей факт не дає змоги використати ТН такого, по суті, наймасовішого типу як основного джерела тепла для систем опалення чи теплопостачання будівель – тільки як додатковий [8].

Експлуатаційні обмеження на використання теплового насосу типу «повітря – вода», який масово випускається світовою промисловістю, зараз у середньому має такі значення:

- за температурою зовнішнього повітря – не нижче -15...-20 °C;
- за температурою теплоносія – не вище +65 °C.

Крім цього, крайні значення цих температур не можуть бути забезпечені одночасно – в подальшому розглянемо цей аспект трохи детальніше.

Вищезгадані обмеження насамперед визначені об'ємами ринків збуту, на які теплові насоси такого типу спрямовуються. Конструкції та технічні характеристики масових серій розробляються з урахуванням кліматичних умов центральної Європи, або більш південніших регіонів. Так звані «скандинавські» версії теплонасосного обладнання зазвичай не дуже часто зустрічаються на нашому ринку і мають велику вартість. Тому для нинішніх, як кліматичних так і економічних умов України, є сенс шукати засоби покращити та розширити роботу стандартного теплонасосного обладнання, що вироблене для більш м'яких кліматичних умов.

Визначення мети та завдання дослідження. Основним завданням проведених досліджень є пошук і теоретичне обґрунтування розширення функціоналу, застосування пристроїв для розширення меж використання стандартного теплонасосного обладнання, призначеного для менш суворих кліматичних умов. Одним із можливих напрямків є адаптація наявного обладнання до українських умов, враховуючи їхню специфіку та вимоги ринку.

Основна частина дослідження.

Отже, ми окреслили, з огляду на одну з найбільших областей використання теплових насосів (далі – ТН), кордони тих систем, які цікаві для подальшого розгляду, – теплові насоси типу «повітря – вода» для житлових та адміністративних будівель.

Намагання застосувати ТН для потреб наявних систем опалення усіх будівель в умовах їхнього поточного технічного стану не завжди можливе. Спадок житлово-комунального господарства України, який залишився від СРСР, – високотемпературні системи опалення (більшість систем у нашому регіоні були розраховані на температурний графік теплоносія $+90/+70$ °С) – унеможливує пряме застосування відносно низькотемпературних ТН стандартних серій, у яких в середньому температури теплоносія, що вони можуть згенерувати, лежать у діапазоні $+65....+30$ °С. Без істотного нарощування площ поверхонь опалювальних приладів система опалення не зможе забезпечити необхідну теплову потужність при роботі від ТН. Слід зазначити, що кліматичні зміни (потепління клімату) трохи нівелюють цю проблему, але не вирішують. Тому найвірогідніші шляхи для застосування такої теплонасосної техніки – це нове будівництво, та реконструкція старих будівель зі зміною системи опалення та доведенням рівня опору теплопередаванню огорожувальних конструкцій будівель до нормативних показників теплозахисту згідно з чинними нормативами ДБН [9]. У цих випадках також вирішується друга особливість створення систем опалення на основі ТН – невеликий, близько 5 °С (проти, зазвичай, 20 °С у старих системах), перепад температур теплоносія між поданням та зворотним потоком, що генерує ТН. Як наслідок цього явища, створюється значно більша витрата теплоносія при циркуляції води в системі.

Отже, можемо сформулювати ще деякі межі ефективного використання ТН типу «повітря – вода» для систем опалення

будівель різноманітного призначення з достатнім рівнем теплозахисту (класи А, Б або С) [10]:

- нове будівництво;
- реконструкція наявних будівель.

З огляду на вищезазначене, сформулюємо вимоги до технічних параметрів ТН «повітря – вода» при застосуванні їх як джерела тепла для систем опалення та теплопостачання найбільшої кількості будівель.

ТН з джерелом низькопотенційного тепла «повітря» має відповідати вимогам до основного джерела тепла і мати змогу генерувати тепло при будь-яких температурах зовнішнього повітря [11]. Тобто, згідно з чинними ДБН України [7], з урахуванням усієї території, робота ТН на тепло має забезпечуватися за температури зовнішнього повітря до -31 °С.

Щодо іншого важливого температурного параметру – температури теплоносія – питання ширше, тому розглянемо його окремо.

Варто зазначити, що за типом конвективної складової передання теплоти до приміщення існує два основні типи опалювальних приладів – з примусовою циркуляцією повітря та з природною конвекцією.

До першого типу – з примусовою конвекцією – відносяться вентиляційні конвектори (фанкойли) та повітро-опалювальні агрегати. Їхня конструкція дуже схожа принципово, це зазвичай ребристотрубний теплообмінник і вентилятор в одному корпусі. Існує багато різновидів компоновок і характеристик цих двох основних компонентів опалювального приладу. Цей тип опалювальних приладів має досить високий коефіцієнт теплопередавання від своїх поверхонь до повітря, тому має змогу використовувати відносно низькотемпературний теплоносій. При правильному підборі таких приладів використовують значення температур теплоносія на вході в прибори від $+40$ °С до $+50$ °С. Однак у них є певна особливість – це

шум від роботи вентилятора і цей факт гальмує масове використання фенкойлів у житлових приміщеннях. Наразі масове використання фенкойлів для опалення (та кондиціонування за потреби) зафіксоване переважно для офісних, адміністративних та промислових будівель.

Другий тип приладів опалення – з природною конвекцією та частковою радіаційною складовою – має набагато (в декілька разів) менший коефіцієнт теплопередавання та при однакових температурних умовах теплоносія та внутрішнього повітря потребує великої площини поверхні теплообміну порівняно з приладами першого типу. Щоб компенсувати збільшення площини поверхні теплообміну, та, як наслідок, збільшення геометричних розмірів, намагаються збільшити різницю температур між внутрішнім повітрям та теплоносієм. З огляду на цей факт, в практиці використання обладнання середні значення температур теплоносія для систем з радіаторів, конвекторів, панелей на вході в прилад складають $+50\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +65\text{ }^{\circ}\text{C}$, за умови збільшення опору теплопередавання оболонки будівлі при поточному ремонті чи реконструкції до нормативних вимог. Цей тип приладів широко використовують для житла, хоча вони також активно використовуються і в будь-яких інших типах будівель, особливо якщо ті не обладнані центральними системами кондиціонування. Слід зазначити, що у таких системах досить часто немає індивідуальних приладів регулювання температури внутрішнього повітря у приміщеннях і регулювання цієї температури здійснюється за рахунок зміни температури теплоносія – нижчої при відносно високих температурах зовнішнього повітря у холодну пору року, та на $20 \dots 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ вищої від початкової температури теплоносія при максимальних похолоданнях.

З іншого боку, для можливості роботи у складі комплексних теплових пунктів, які

також готують воду для системи гарячого водопостачання за будь-яких погодних умов треба мати теплоносії не нижче $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Підсумовуючи потреби до температури теплоносія у системах опалення з використанням теплового насосу класу «повітря – вода», нанесемо їх на графіки температурних меж роботи різних типів ТН (рис. 1). Далі проведемо аналіз відповідності наявних температурних характеристик ТН вимогам до систем будівель, провівши огляд можливостей сучасної теплонасосної техніки.

Виконаємо огляд серійних зразків теплонасосної техніки з урахуванням потреб систем опалення.

Як було зазначено вище, теплові насоси типу «повітря – вода» мають певні обмеження за температурними діапазонами їх використання як за повітрям, так і за водою. Для наочності зведемо ці показники на графік (рис. 1) та усереднимо інформацію з наявних температур від декількох виробників. Також покажемо залежність температурних обмежень від типу компресору, який було використано в тепловому насосі. З метою демонстрації потенціалу сучасних компресорів порівняно з їхніми попередниками, було проаналізовано кілька грандових європейських виробників теплових насосів (Hidros, Clivet, Alpentia, Hitema). Усі дані були зведені на один графік продуктивності. Для спрощення сприймання інформації на рис. 1 розглядаємо тільки картину з використанням фреону R410a. За використання інших фреонів картина приблизно така ж, але значення температур дещо інші. В поточному стані ринку теплових насосів фреон R410a має найширше використання.

Тепер продемонструємо рис. 2, на якому зведено температурні можливості сучасної стандартної теплонасосної техніки з потребами з температурних параметрів систем опалення різного типу, які ми розглядали вище. На ньому добре видно, що є досить відчутні обмеження з використання

того чи іншого ТН за типом компресора порівняно з типом приладів, що використовуються в системах опалення чи теплопостачання. Для збільшення енергетичної (а, в наслідок, і економічної) привабливості

використання ТН в системах опалення потрібно шукати шляхи розширення меж температурних обмежень ТН та максимальної відповідності діапазону роботи ТН до потреб систем опалення з температури.

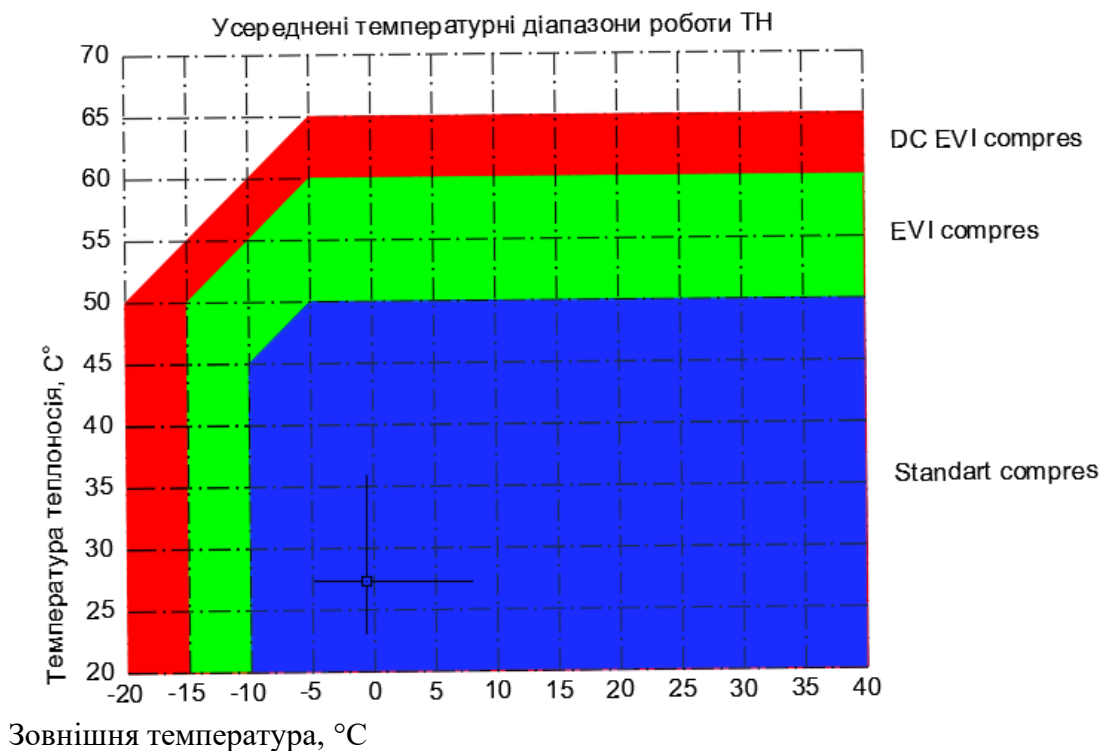


Рис. 1. Обмеження за температурними діапазонами використання теплових насосів типу «повітря – вода»

Визначимо шляхи розширення температурного діапазону роботи ТН. Наразі відбувається процес поступового покращення характеристик ТН за багатьма показниками. Перерахуємо основні:

- зменшення перепаду температур фреону та повітря;
- збільшення кількості повітря, що проходить крізь установку;
- збільшення площі поверхні теплообмінників;
- збільшення холодильного коефіцієнта за рахунок технології (EVI);
- збільшення холодильного коефіцієнта за рахунок плавного керування потужністю компресора (DC);

- збільшення холодильного коефіцієнта за рахунок об'єднання цих технологій (EVI) і (DC);

- пошук холодоагентів з кращими показниками для використання в циклі ТН.

Технологія (EVI) – це технологія проміжного впорскування холодного фреону, що дає змогу переохолоджувати холодоагент, а також охолоджує компресор, що розширює температурний діапазон роботи ТН [12].

Технологія (DC) дає змогу регулювати потужність компресора і вентиляторів за допомогою зміни величини струму і напруги [13].

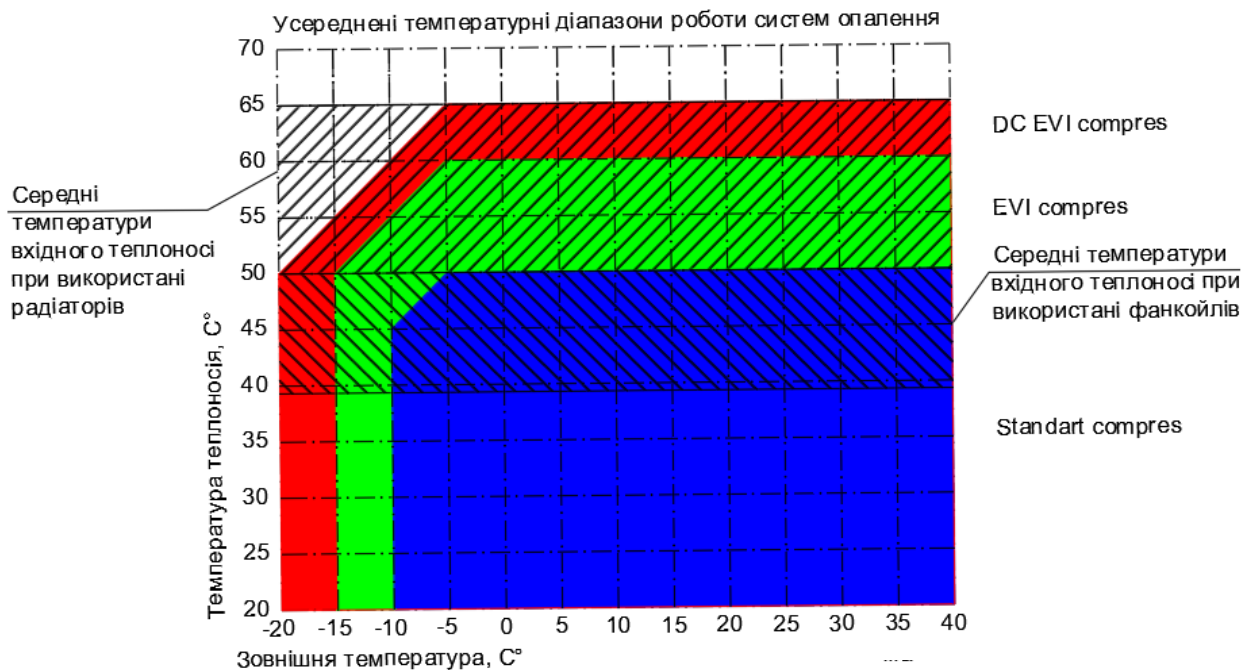


Рис. 2. Зіставлення температурних можливостей сучасної теплонасосної техніки з потребами за температурними параметрами систем опалення

Окремо від прямих конструктивних покращень для пари «ТН – система опалення» розглядаються різні можливості з акумуляції тепла [14].

З огляду на перераховані можливі шляхи підвищення ефективності ТН та розширення температурних діапазонів їхнього використання запропонуємо ще один шлях. Його суть полягає у використанні акумулятора тепла/холоду на основі фазового переходу «вода – крига» для отримання низькопотенційного тепла для роботи ТН у періоди, коли зовнішні температури будуть виходити за границі обмежень, що диктуються стандартною конструкцією ТН.

Пропонується модифікувати конструкцію ТН так, щоб мати змогу використовувати стандартні акумулятори тепла/холоду з фазовим переходом «вода – крига». Більшість таких акумуляторів для своєї роботи потребує холодоносіїв з температурами $-10^{\circ}\text{C}/-5^{\circ}\text{C}$. Щоб отримати холодоносіїв з такими

температурами, потрібно включити в склад ТН ще один теплообмінник «фреон – рідина» та дати йому змогу працювати в режимі випарника.

Цей режим необхідно використовувати тоді, коли зовнішня температура повітря не дає змоги працювати ТН через його конструктивні обмеження – тобто зовнішня температура повітря занизька для роботи ТН, або потреба в нагріві теплоносія для системи опалення не може бути задоволена.

Використання акумулятора тепла/холоду на основі фазового переходу «вода – крига» дає змогу проходити періоди, що виходять за температурні обмеження роботи ТН без перемикання систем опалення та теплопостачання на інші джерела тепла. З огляду на значне пом'якшення клімату, є розуміння, що проходження піку стояння від'ємних температур у холодну пору року з зовнішніми температурами повітря нижче, припустимо -15°C , не буде перевищувати

декількох діб. Це питання потребує окремого розгляду та вивчення насамперед для розуміння того, якої ємності акумулятор тепла/холоду необхідно мати для проходження піку холоду і мати змогу розрахувати оптимальні параметри системи опалення та ТН для кожного типу будівель.

У подальшому, після проходження піку холоду, система має повернути акумулятор у первісний рідкий стан при настанні сприятливих зовнішніх умов і достатньому запасу потужності. Цей алгоритм реалізується відповідними контролерами.

Окремо слід зазначити, що акумуляція тепла за рахунок фазового переходу «вода – крига» має досить високі питомі показники щодо об'єму, який займає ця система порівняно з іншими нескладними та екологічними системами. Крім того, температура випаровування холодоагенту, потрібна для підтримки процесу фазового переходу, якщо порівняти її з повітряним

теплообмінником, буде відповідати температурі зовнішнього повітря на рівні $-7 \dots -5$ °С, що підвищить холодильний (а як наслідок і тепловий) коефіцієнт роботи ТН. Сумарний сезонний коефіцієнт перетворення тепла у такої системи буде відчутно кращий ніж у систем без застосування акумулятора тепла.

Висновки. Отримано кореляцію температурних можливостей сучасної теплонасосної техніки з вимогами до температурних параметрів теплоносія систем опалення різного типу. Показано, що є досить відчутні обмеження з використання того чи іншого ТН за типом компресора щодо типу приладів, які використовуються в системах опалення.

Сформульовані шляхи розширення температурного діапазону роботи ТН.

Запропонована модифікація конструкції ТН з метою використання стандартних акумуляторів тепла/холоду з фазовим переходом «вода – крига».

Список використаних джерел

1. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В., Анохіна К. В. Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання: навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2010. 170 с.
2. Низькопотенційна енергетика: навч. посіб. / А. О. Редько та ін.; за ред. А. А. Долинського. Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид», 2016. 412 с.
3. Annex 35/13 (2014) Application of Industrial Heat Pumps: IEA Industrial Energy-related Systems and Technologies Annex 13, IEA Heat Pump Programme Annex 35. Final Report, Hannover.
4. Безродний М. К., Галан М. А. Термодинамічна ефективність теплонасосних систем повітряного опалення та вентиляції з рекуператором теплоти та рециркуляцією відпрацьованого повітря. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. Київ: КПІ. 2012. № 1. С. 15-25.
5. Sharma V. M., Shena B.-J., Keinathb C. F. *Reports at the 12th IEA Heat Pump Conference*. Rotterdam. 2017. Pp. 29-80.
6. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України / НАН України, Інститут відновлюваної енергетики, Держ. ком. України з енергозбереження. Київ, 2005. 45 с.
7. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. [Чинний з 01.11.2011]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=26655 (дата звернення 02.01.2024).

8. Шубенко В. О., Кухарець С. М. Використання низькотемпературних джерел енергії та їх перетворювачів. *Житомир: «ЖНАУ»*. 2014. 240-261 с.
9. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Затв. Наказом Міністерства розвитку громад та територій України від 30.12.2021 № 366. [Чинний з 01.09.2022]. URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=47699 (дата звернення 02.01.2024).
10. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: розпорядження КМУ від 21.04.2023 р. № 373-р Офіційний вісник України. 2023.16.05. (№ 47). С. 156. [Чинний з 21.04.2023]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80/print> (дата звернення 02.01.2024).
11. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. Затв. Наказом Міністерства регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України від 25.01.2013 № 24. [Чинний з 01.01.2014]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50154 (дата звернення 02.01.2024).
12. Enhanced vapour injection (evi) for zh copeland™ scroll compressors. Technical Information. URL: <https://www.copeland.com/documents/enhanced-vapour-injection-for-zh-copeland-scroll-compressors-technical-information-en-gb-4215484.pdf> (дата звернення 02.01.2024).
13. Refrigeration and air conditioning technology Technical Information. URL: https://gunt.de/images/download/Cat3a_english.pdf (дата звернення 02.01.2024).
14. Будлянський С. В., Редько О. Ф., Чайка Ю. І. Порівняння теплоакумуючих матеріалів з фазовим переходом для систем сонячного теплопостачання. *Енергозберігаючі технології теплогазопостачання, будівництва та муніципальної інфраструктури. Науковий вісник будівництва*. Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. 2013. Вип. № 1 (83), С. 143 -146.

Корчагін Михайло Сергійович, аспірант кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ID ORCID: 0009-0005-2840-0211. Тел. +38 (057) 707-31-09. E-mail: mykhailo.korchahin@kname.edu.ua.

Korchagin Mykhailo, postgraduate graduate student of the department of heat and gas supply and ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ID ORCID: 0000-0003-1021-4662. Tel.: +38 (057) 707-31-09. E-mail: valentina.belyaeva@kname.edu.ua

Статтю прийнято 27.03.2025 р.

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 528:332.3

ОРГАНІЗАЦІЯ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РОЗВИТКУ ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ РЕГІОНІВ

Д-р екон. наук К. А. Мамонов, д-р техн. наук К. О. Метешкін,
канд. техн. наук Е. С. Штерндок, асп. В. С. Ковальчук

ORGANIZATION OF TERRITORIAL DEVELOPMENT OF LAND USE OF REGIONS

Dr. Sc. (Econ.) K. Mamonov, Dr. Sc. (Tech.) K. Meteshkin,
PhD (Tech.) E. Shterndok, postgraduate student V. Kovalchuk

***Анотація.** Доведено, що формування сучасної системи використання земель, перманентні трансформаційні процеси потребують переосмислення підходів для організації територіального розвитку землекористування на регіональному рівні. За останні роки відбувається гальмування територіального розвитку регіонів, зниження ефективності використання земель. Це обумовлено регіональними асиметріями, негативним впливом внутрішніх чинників землекористування, зниженням ефективності взаємодії стейкхолдерів. У цьому контексті особливе значення мають наслідки агресії РФ, які потребують залучення значних фінансових ресурсів для відбудови земельно-майнового комплексу на регіональному рівні. Досягнуто мету дослідження з визначення організаційних аспектів забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів.*

***Ключові слова:** територіальний розвиток, використання земель регіонів, організація розвитку територій, оцінювання, стейкхолдери.*

***Abstract.** It is proven that the formation of a modern land use system, permanent transformation processes, require rethinking approaches to the organization of territorial development of land use at the regional level. In recent years, there has been a slowdown in the territorial development of regions, a decrease in the efficiency of land use. This is due to regional asymmetries, the negative impact of internal land use factors, a decrease in the efficiency of stakeholder interaction. In this context, the consequences of the Russian Federation's aggression are of particular importance, which require the involvement of significant financial resources to rebuild the land and property complex at the regional level.*

The goal of the study was achieved to determine the organizational aspects of ensuring the territorial development of land use in the regions. The achievement of the set goal is carried out on the basis of solving the following tasks: building a multi-level system of indicators for assessing the level of ensuring the territorial development of land use in regions; identifying stakeholder factors that influence the provision of the territorial development of land use; assessing stakeholder factors of the territorial development of land use in regions; developing organizational measures to ensure the territorial development of land use.

A quantitative basis has been formed that allows us to identify organizational aspects for ensuring territorial development of land use in regions, taking into account the directions and features of stakeholder interaction. In modern conditions, it is proposed to build an organizational

security structure in the land use system to ensure territorial development of land use. The organization of territorial development at the regional level is determined by the need for stakeholder interaction, which is aimed at managing land relations, focused on the use of tools to increase the investment attractiveness of lands.

Keywords: *territorial development, regional land use, territorial development organization, assessment, stakeholders.*

Вступ. Формування сучасної системи використання земель (ВЗ), перманентні трансформаційні процеси потребують переосмислення підходів для організації територіального розвитку (ТР) землекористування на регіональному рівні. За останні роки відбувається гальмування територіального розвитку регіонів, зниження ефективності використання земель. Це обумовлено регіональними асиметріями, негативним впливом внутрішніх чинників землекористування, зниженням ефективності взаємодії стейкхолдерів. У цьому контексті особливе значення мають наслідки агресії РФ, які потребують залучення значних фінансових ресурсів для відбудови земельно-майнового комплексу на регіональному рівні.

Відповідно до цілей сталого розвитку України на період до 2030 року, визначеному в Указі Президента, саме забезпечення територіального розвитку використання земель дає змогу:

- вирішити проблеми бідності шляхом підвищення ефективності використання земель сільськогосподарського призначення, що забезпечить у тому числі продовольчу безпеку, подолання бідності, поліпшення харчування і сприяння сталому розвитку сільського господарства;

- забезпечити поступальне, всеохоплююче і стає економічне зростання, повну і продуктивну зайнятість і гідну працю для всіх на основі формування сучасної політики землекористування;

- створити стійку інфраструктуру, сприяти всеохоплюючій і сталій індустріалізації та інноваціям шляхом зростання ефективності використання земельно-майнового комплексу;

- забезпечити відкритість, безпеку, життєстійкість й екологічну стійкість міст, інших населених пунктів у контексті забезпечення територіального розвитку використання земель;

- створити умови для захисту і відновлення екосистем суші та сприяння їх раціональному використанню, раціональному лісокористуванню, боротьбі з опустелюванням, припиненням і поверненням назад (розвертанням) процесу деградації земель і зупинці процесу втрати біорізноманіття як важливого компонента забезпечення територіального розвитку використання земель [1].

Процеси забезпечення територіального розвитку використання земель залежать від його організації. У цьому контексті особливе значення мають рівень взаємодії стейкхолдерів і формування відповідної кількісної основи для ухвалення відповідних обґрунтованих рішень.

Отже, тема дослідження з організації територіального розвитку використання земель регіонів є актуальною і має сучасні аспекти функціонування та взаємодії стейкхолдерів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових розробках розглянуто напрями та особливості забезпечення територіального розвитку використання земель: територіальні аспекти і напрями розвитку у сфері використання земель регіонів [2–4], просторові аспекти територіального розвитку використання земель [5].

Для організації територіального розвитку використання земель запропоновано враховувати містобудівні та екологічні чинники, що відповідає сучасним

напрямам землекористування. Крім того, через агресію РФ зростає значення безпекових чинників у системі ТР ВЗ на регіональному рівні.

На формування та забезпечення територіального розвитку використання земель на регіональному рівні впливають стейкхолдерні чинники. У цьому контексті слід відзначити наукові розробки авторів [6–11]. Визначено групи стейкхолдерів, що взаємодіють у системі територіального розвитку використання земель регіонів: центральні органи державної влади, що впливають на забезпечення територіального розвитку використання земель; регіональні органи державної влади; регіональні органи місцевого самоврядування; зацікавлені особи, які взаємодіють у системі функціонування територіальних громад; підприємства і організації, що взаємодіють у системі земельних відносин; проєктні організації, що функціонують у системі земельних відносин; підприємства і організації, що формують просторове забезпечення земельних відносин; зацікавлені особи, які формують містобудівне забезпечення земельних відносин; підприємства та організації, що функціонують у сфері екологічної безпеки і впливають на формування та реалізацію земельних відносин; стейкхолдери, що забезпечують інвестиційну привабливість земель на регіональному рівні; фізичні

особи, які отримують послуги у сфері здійснення земельних відносин; інші стейкхолдери, що функціонують у системі земельних відносин на регіональному рівні.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення організаційних аспектів забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів. Досягнення поставленої мети здійснюється на основі вирішення таких завдань:

- побудова багаторівневої системи показників оцінювання рівня забезпечення ТР використання земель регіонів;
- виокремлення стейкхолдерних чинників, що впливають на забезпечення територіального розвитку ВЗ;
- оцінювання стейкхолдерних чинників ТР використання земель регіонів;
- розроблення організаційних заходів для забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів.

Основна частина дослідження. Для визначення організаційних аспектів територіального розвитку використання земель регіонів удосконалено типологічну структуру та побудовано багаторівневу систему показників оцінювання (табл. 1).

На рис. 1 зображено багаторівневу систему показників оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів з урахуванням графічного аспекту.

Таблиця 1

Багаторівнева система показників оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів: методичний аспект

Локальний чинник	Метод оцінювання: аналітичні (А); експертні (Е)
1	2
функційні:	
$TD_{11}, TD_{12}, TD_{13}, TD_{14}, TD_{15}, TD_{16}$	Е
просторові:	
$TD_{21}, TD_{23}, TD_{24}, TD_{25}, TD_{26}, TD_{27}, TD_{28}, TD_{29}, TD_{210},$ $TD_{211}, TD_{212}, TD_{213}, TD_{214}, TD_{215}, TD_{216}$	Е
TD_{22}	А

Продовження табл. 1

1	2
містобудівні:	
$TD_{31}, TD_{32}, TD_{33}, TD_{34}, TD_{35}, TD_{36}, TD_{37}, TD_{38}, TD_{39},$ $TD_{310}, TD_{311}, TD_{312}, TD_{313}, TD_{314}, TD_{315}, TD_{316}$	E
$TD_{317}, TD_{318}, TD_{319}$	A
екологічні:	
$TD_{41}, TD_{42}, TD_{43}, TD_{44}, TD_{45}, TD_{46}, TD_{47}, TD_{48}, TD_{49},$ $TD_{410}, TD_{411}, TD_{412}, TD_{413}, TD_{414}, TD_{415}$	E
$TD_{416}, TD_{417}, TD_{418}$	A
інвестиційно-інноваційні:	
$TD_{51}, TD_{514}, TD_{515}, TD_{516}, TD_{517}$	A
$TD_{52}, TD_{53}, TD_{54}, TD_{55}, TD_{56}, TD_{57}, TD_{58}, TD_{59}, TD_{510},$ $TD_{511}, TD_{512}, TD_{513}$	E
безпекові:	
$TD_{61}, TD_{62}, TD_{63}, TD_{64}, TD_{65}, TD_{66}, TD_{67}, TD_{68}, TD_{69},$ $TD_{610}, TD_{611}, TD_{612}, TD_{613}, TD_{614}, TD_{615}, TD_{616}, TD_{617},$ TD_{618}	E
соціальні:	
$TD_{71}, TD_{72}, TD_{73}, TD_{74}, TD_{75}, TD_{76}, TD_{77}, TD_{78}, TD_{79},$ $TD_{710}, TD_{711}, TD_{712}, TD_{713}, TD_{714}, TD_{715}$	E
стейкхолдерні:	
$TD_{81}, TD_{82}, TD_{83}, TD_{84}, TD_{85}, TD_{86}, TD_{87}, TD_{88}, TD_{89},$ $TD_{810}, TD_{811}, TD_{812}$	E

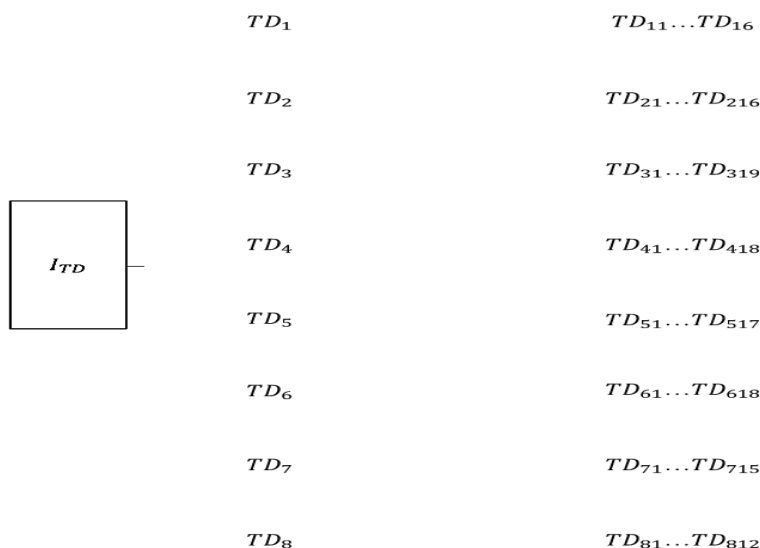


Рис. 1. Багаторівнева система показників рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів: графічний аспект

Визначено стейкхолдерні чинники (TD_8), а саме рівні взаємодії центральних органів державної влади, що впливають на забезпечення територіального розвитку використання земель (TD_{81}); регіональних органів державної влади (TD_{82}); регіональних органів місцевого самоврядування (TD_{83}); зацікавлених осіб, які взаємодіють у системі функціонування територіальних громад (TD_{84}); підприємств і організацій, що взаємодіють у системі земельних відносин (TD_{85}); проєктних організацій, що функціонують у системі земельних відносин (TD_{86}); підприємств і організацій, що формують просторове забезпечення земельних відносин (TD_{87}); зацікавлених осіб, які формують містобудівне забезпечення земельних відносин (TD_{88}); підприємств і організацій, що функціонують у сфері екологічної безпеки і впливають на формування та

реалізацію земельних відносин (TD_{89}); стейкхолдерів, що забезпечують інвестиційну привабливість земель на регіональному рівні (TD_{810}); фізичних осіб, які отримують послуги у сфері здійснення земельних відносин (TD_{811}); інших стейкхолдерів, що функціонують у системі земельних відносин на регіональному рівні (TD_{812}).

Для визначення стейкхолдерних чинників у рамках запропонованого комплексного підходу для оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів застосовано експертні методи. Реалізація методів здійснюється відповідно до діапазону значень від 0 до 10, значення яких узагальнено за моделлю середньої арифметичної. Результати оцінювання локальних стейкхолдерних чинників подано в табл. 2 і на рис. 2.

Таблиця 2

Результати оцінювання локальних стейкхолдерних чинників рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, відн. од.

Регіон	TD_{81}	TD_{82}	TD_{83}	TD_{84}	TD_{85}	TD_{86}	TD_{87}	TD_{88}	TD_{89}	TD_{810}	TD_{811}	TD_{812}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Вінницький	4,278	4,667	5,5	4,778	4,444	4	4,889	4,5	5,222	3,889	4,5	4,667
Волинський	4	4,389	4,889	4,111	3,556	3,167	4,222	3,833	4,5	3,389	4,167	3,833
Дніпропетровський	4,611	5,056	5,611	5,056	4,667	4,389	5,278	5,056	5,389	4,278	4,778	4,889
Донецький	0,333	0,444	1,111	0,5	0,222	0,222	0,611	0,5	0,556	0,167	0,222	0,333
Житомирський	3,556	4,5	5,222	4,667	4,111	3,667	4,5	4,278	4,833	3,667	4,278	4,5
Закарпатський	3,944	4,778	5,389	4,944	4,667	4,111	4,833	4,444	5	4,667	4,889	4,944
Запорізький	3	4	4,556	4	3,556	3,111	3,722	3,278	3,833	2,667	3,5	3,278
Івано-Франківський	4,278	4,667	5,444	4,833	4,556	4,222	4,833	4,556	5,167	4,333	4,833	5
Київський	4,833	5,333	6,056	5,389	5,222	5	5,722	5,222	5,611	5,333	5,5	5,722
Кіровоградський	4,111	4,389	5	4,389	4,111	3,667	4,389	4,222	4,611	3,833	4,444	4,444
Луганський	0,111	0,111	0,278	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,111	0,056	0,056	0,056
Львівський	4,667	5,056	5,667	5,222	5,056	4,833	5,389	5,056	5,444	5,278	5,5	5,5
Миколаївський	3,667	4,111	4,5	4,111	3,444	2,944	3,556	3,111	3,833	3,111	3,5	3,333
Одеський	3,556	3,944	4,667	4,167	3,778	3,222	4,056	3,5	4,278	3,722	4,111	3,722
Полтавський	4,167	4,722	5,278	4,944	4,722	4,389	5,167	4,778	5,222	4,778	4,944	5,167
Рівненський	3,833	4,444	4,944	4,667	4,444	3,944	5,056	4,5	4,778	4,444	4,889	4,944

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Сумський	3,611	4,056	4,5	4,111	3,556	3,167	3,778	3,389	3,833	3,222	3,722	3,444
Тернопільський	4,222	4,722	5,167	5	4,778	4,444	5,111	4,667	5,056	4,889	5	5,222
Харківський	3,833	4,056	4,833	4,222	3,556	3,167	4,167	3,444	4,111	3,222	3,611	3,444
Херсонський	3,056	3,5	4,111	3,556	3	2,611	3,389	2,833	3,222	2,556	3,222	3
Хмельницький	3,889	4,611	5,278	4,778	4,556	4	4,889	4,611	4,944	4,889	5	5,111
Черкаський	3,667	4,167	4,944	4,778	4,167	3,889	4,833	4,333	4,611	4,444	4,778	4,889
Чернівецький	3,944	4,389	5,056	4,722	4,5	4	4,889	4,444	4,778	4,389	4,722	4,778
Чернігівський	3,943	4,278	4,889	4,556	4,167	3,667	4,778	4,278	4,778	4,111	4,667	4,722

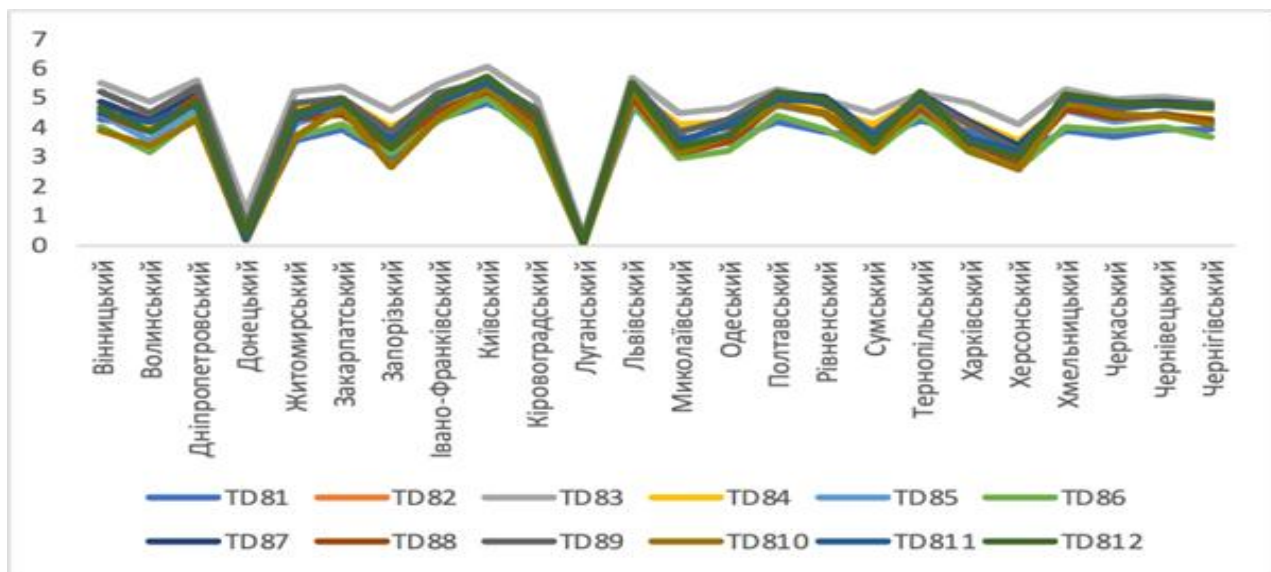


Рис. 2. Результати оцінювання локальних стейкхолдерних чинників рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів: графічний аспект, відн. од.

У результаті оцінювання визначено, що в більшості регіонів відбувається низький або несуттєвий рівень ефективності взаємодії центральних органів влади для забезпечення територіального розвитку використання земель: Донецький, Житомирський, Закарпатський, Запорізький, Луганський, Миколаївський, Одеський, Рівненський, Сумський, Харківський, Херсонський, Хмельницький, Черкаський, Чернівецький, Чернігівський. На посередньому рівні взаємодія відбувається в таких регіонах: Вінницький, Волинський, Дніпропетровський, Івано-Франківський, Київський, Кіровоградський,

Львівський, Полтавський, Тернопільський. За досліджений період спостерігають зростання значення регіональних органів державної влади та органів місцевого самоврядування в системі територіального розвитку використання земель регіонів. У системі ТР ВЗ відіграє важливе значення чинник, що забезпечує ефективність взаємодії стейкхолдерів. Разом із цим на низькому рівні ця взаємодія здійснюється в Донецькому та Луганському регіонах, знижується їхнє значення у Херсонській області, що обумовлено наслідками агресії РФ. Крім того, зростає значення та рівень взаємодії підприємств і організацій, що

формують просторове забезпечення земельних відносин у системі територіального розвитку використання земель регіонів. У більшості регіонів спостерігають посередній рівень взаємодії зацікавлених осіб, які формують містобудівне забезпечення земельних відносин у системі територіального розвитку, що відповідно до сучасних тенденцій у сфері земельних відносин визначені траєкторіями до зростання взаємодії підприємств і організацій, що функціонують у сфері екологічної безпеки.

Для оцінювання системного стейкхолдерного чинника рівня забезпечення ТР ВЗ регіонів застосовано модель

$$TD_8 = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n TD_{8j}}. \quad (1)$$

Результати оцінювання системного стейкхолдерного чинника рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів подано в табл. 3.

Таблиця 3

Результати оцінювання системного стейкхолдерного чинника рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, відн. од.

Регіон	Значення показника
Вінницький	4,631
Волинський	4,016
Дніпропетровський	4,932
Донецький	0,378
Житомирський	4,329
Закарпатський	4,752
Запорізький	3,546
Івано-Франківський	4,744
Київський	5,422
Кіровоградський	4,329
Луганський	0,076
Львівський	5,234
Миколаївський	3,622
Одеський	3,927
Полтавський	4,875
Рівненський	4,604
Сумський	3,717
Тернопільський	4,877
Харківський	3,814
Херсонський	3,182
Хмельницький	4,746
Черкаський	4,465
Чернівецький	4,584
Чернігівський	4,434

Висновки. Рівень забезпечення стейкхолдерних відносин у більшості регіонів формується та реалізується

посередніми темпами. Це підвищує забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів. Разом із цим

на низькому рівні здійснюються стейкхолдерні відносини в Донецькому та Луганському регіонах.

Удосконалено типологічну структуру територіального розвитку використання земель, формування якої здійснюється шляхом систематизації нормативно-правового та інформаційно-аналітичного забезпечення, обґрунтування теоретичних положень, яка дає змогу визначити чинники для побудови багатофакторної системи показників оцінювання рівня забезпечення ТР ВЗ регіонів.

У результаті дослідження побудовано багаторівневу систему показників оцінювання територіального розвитку використання земель регіонів, серед яких виокремлено стейкхолдерні чинники, які впливають на його організацію.

Багаторівнева система показників оцінювання рівня забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів, на відміну від наявних, базована на локальних, системних чинниках для визначення інтегрального показника і розроблення комплексного підходу.

Сформовано кількісну основу виокремлення організаційних аспектів для забезпечення територіального розвитку використання земель регіонів з урахуванням напрямів та особливостей взаємодії стейкхолдерів. Отже, організаційним напрямом забезпечення ТР ВЗ є подальше зростання рівня ефективності відносин між органами державної, місцевої влади, місцевого самоврядування і територіальними громадами. Важливе значення має формування партнерських відносин між підприємствами та організаціями, що створюють просторове, містобудівне, екологічне забезпечення із застосуванням геоінформаційних систем. У сучасних умовах для забезпечення територіального розвитку використання земель запропоновано побудувати організаційну безпекову структуру в системі землекористування. Організацію ТР ВЗ на регіональному рівні визначено необхідністю взаємодії стейкхолдерів, направленої на управління земельними відносинами, орієнтованими на застосування інструментарію підвищення інвестиційної привабливості земель.

Список використаних джерел

1. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року: Указ Президента України № 722/219 від 30.09.2019 р. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825>.
2. Територіальний розвиток та регіональна політика в Україні / НАН України. ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долишнього НАН України»; наук. ред. В. С. Кравців. Львів, 2015. 246 с. URL: <https://ird.gov.ua/irdp/p20160101.pdf>.
3. Єрошкіна О. О. Територіальні природно-економічні відмінності як об'єктивна основа територіального розподілу праці і регіонального розвитку. *Державне будівництво*. 2009. № 2. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/DeBu_2009_2_26.
4. Мезенцев К. В. Суспільно-географічне прогнозування регіонального розвитку: монографія. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2005. 93 с.
5. Борушак М. Проблеми формування стратегії розвитку туристичних регіонів: монографія. Львів: ІРД НАН України, 2006. 288 с.
6. Грек М. О. Визначення стейкхолдерів у системі земельних відносин міст. *Комунальне господарство міст. Серія: Землекористування, оцінка землі та нерухомості*. 2017. Вип. 135. С. 171–174. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5045/4996>.

7. Мамонов К. А., Метешкін К. О., Грек М. О. Розробка стейкхолдерно-орієнтованого підходу до оцінки впливу містобудівних факторів на використання земель міст. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2017. № 3. С. 160–164.
8. Freeman R. E., Harrison J. S., Wicks A. C., Parmar B. L., Colle S. Stakeholder Theory: the state of the art. *The Academy of Management Annals*. 2010. № 3(1). P. 403–445. URL: <https://journals.aom.org/doi/10.5465/19416520.2010.495581>.
9. Hill C. Stakeholder-Agency Theory. *Journal of Management Studies*. 1992. № 2. P. 131–154.
10. Mamonov K., Velychko V., Grytskov E., Zubarev D. Econometric modeling of the level of stakeholder interaction at construction enterprises. *Український метрологічний журнал*. 2020. № 2. С. 72–77.
11. Mamonov K., Grytskov E., Velychko V., Troian V. The Formation and use of the Construction Enterprise Brand to Ensure Interaction with Stakeholders. *Management Theory and Studies for Rural Business and Infrastructure Development*. 2020. Vol. 42. № 4. P. 434–440.

Мамонов Костянтин Анатолійович, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-0797-2609. Тел.: +38(099)291-73-54. E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com.

Метешкін Костянтин Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-1170-2062. E-mail: meteshkin@gmail.com.

Штерндок Ернест Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-1107-7401. E-mail: shterndok@ukr.net.

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.

Meteshkin Kostiantyn, Dr. Sc. (Techn.), Professor, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-1170-2062. E-mail: meteshkin@gmail.com.

Shterndok Ernest, PhD (Tech.), Docent, Department of Land Administration and Geographic Information Systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-1107-7401. E-mail: shterndok@ukr.net.

Kovalchuk Vasyi, 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 26.02.20255 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 622.41.012

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗНАНЬ ЗДОБУВАЧІВ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ З БЕЗПЕКОВИХ ДИСЦИПЛІН ЯК НАПРЯМ ЗНИЖЕННЯ ТРАВМАТИЗМУ У ВИРОБНИЧІЙ І НЕВИРОБНИЧІЙ СФЕРАХ

Канд. техн. наук Я. О. Сєріков, д-р техн. наук В. Г. Брусенцов,
канд. техн. наук К. В. Данова, канд. техн. наук В. А. Герасименко,
О. В. Гаряжа, д-р техн. наук С. М. Логвінков

IMPROVEMENT OF KNOWLEDGE OF STUDENTS OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS OF SAFE DISCIPLINES AS A DIRECTION OF INJURY REDUCTION IN THE MANUFACTURING AND NON-MANUFACTURING SPHERE

PhD (Tech.) Ya. Serikov, Dr. Sc. (Tech.) V. Brusentsov,
PhD (Tech.) K. Danova, PhD (Tech.) V. Gerasimenko,
O. V. Garyaga, Dr. Sc. (Tech.) S. Logvinkov

***Анотація.** Досліджено всесвітню проблему надвисокого рівня професійних захворювань, травматизму у виробничій і невиробничій сферах. Описано позицію Міжнародної організації праці стосовно вирішення цієї проблеми. Проаналізовано зміни обсягу навчального навантаження безпекових дисциплін, що вивчають у ЗВО України. Підтверджено взаємозв'язок зниження безпекової відповідальності працюючих здобувачів, населення в системах «людина – невиробниче середовище», «людина – виробниче середовище» зі зниженням обсягу, рівня знань.*

***Ключові слова:** безпека життєдіяльності, охорона праці, цивільний захист, навчальне навантаження, безпека людини, виробничий, побутовий, невиробничий травматизм.*

***Abstract.** At this stage of the evolution of human society, the formation of the sphere of human security takes place under the influence of a complex dynamic process, which includes the intensification of scientific and technical progress, comprehensive informatization, a critical level of anthropogenic load on the Earth's biosphere, and the intensification of emergency situations. Moreover, this applies to both the «man – production environment» and «man – non-production, household environment» systems. The conclusions of the International Labor Organization and the World Health Organization, which are based on the analysis of statistical data for the last 5...7 years, indicate the following. The injury rate in these systems is not only dangerously high, but also has a steady upward trend. The security situation in Ukraine is extremely difficult. Its complexity is significantly increased by the current emergency situation of a military nature. At the same time, it negatively affects the safety condition of the «man – production environment» system. Thus, according to the data of the State Labor Department of Ukraine for 2022-2023, military actions of Russia's armed aggression became a fairly frequent cause of industrial accidents. The analysis of the causes of accidents in the production, non-production and household spheres shows that the risks are realized in most cases due to the lack of safety knowledge, irresponsibility of employees to comply*

with the established safety rules when performing work, ignorance and lack of knowledge of a significant part of the population of Ukraine about possible dangers during their stay, including outside the production environment. The fact that even in the field of educational activities a significant number of accidents, including those involving employees of educational institutions, is alarming. Based on this situation in the field of safety, official documents have been developed in Ukraine, which describe ways to reduce the level of injuries in industrial, non-industrial and household spheres. In these documents, it is determined that the improvement of the education system is one of the main directions of solving the problem. Similar conclusions were made in foreign countries. That is, the relationship between the decrease in the safety responsibility of students, workers, and the population with the decrease in the level of knowledge in the field of safety has been confirmed.

Keywords: *life safety, labor protection, civil protection, educational workload, human safety, industrial, domestic, non-industrial injuries.*

Вступ. На теперішній період часу еволюції людства ситуація у сфері безпеки формується під впливом складного динамічного процесу, в основі якого лежать глобалізація, науково-технічний прогрес, інформатизація, посилення антропогенного навантаження на навколишнє середовище, інтенсифікація надзвичайних ситуацій. Такий процес супроводжений виникненням нових ризиків і загроз для людини й суспільства в цілому, оскільки практично з кожним досягненням науково-технічного прогресу – новим знаряддям праці, новою технологією чи матеріалом, засобом комфорту в побуті, наявною надзвичайною ситуацією – зазвичай виникають нові потенційні небезпеки. В Україні особливо суттєвий негативний вплив на безпекову ситуацію має наявна надзвичайна ситуація воєнного характеру [1]. За даними Держпраці, однією з частих причин нещасних випадків на виробництві у 2022-2023 рр. стали воєнні дії на території України через збройну агресію.

Травматизм невиробничого характеру, зокрема в системі «людина – побутове середовище», також є актуальною проблемою в країнах світу і Україні. Тобто на сьогодні травматизм є однією з найважливіших медико-соціальних проблем, в економічно розвинених країнах світу травми за їхньою кількістю займають третє місце серед причин смерті населення, причому серед осіб працездатного віку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За статистичними оцінками, глобальна чисельність працівників (у світовому масштабі) складає близько 2,84 млрд осіб, зайнятих у різних галузях виробничої і невиробничої діяльності. З виконанням виробничих завдань унаслідок недостатнього рівня знань, недодержання регламентованих правил із безпеки, гігієни праці, електробезпеки, за даними Міжнародної організації праці (МОП), в усьому світі щорічно виникає близько 340 млн нещасних випадків на виробництві, стають жертвами професійних захворювань близько 160 млн осіб [2, 3]. При цьому з усієї вказаної кількості працівників близько 2,3 млн осіб гинуть щороку. У середньому щодня це складає 6 000 осіб.

Одним із найбільш об'єктивних статистичних показників виробничого травматизму є дані з нещасних випадків із летальними наслідками. На сьогодні рівень смертельного виробничого травматизму в розрахунку на 1000 працівників в економічно розвинених країнах світу порівняно з аналогічним показником в Україні має такі значення: Великобританія – 0,016 (у 10 разів менше); Японія – 0,02 (у сім разів менше); Фінляндія – 0,038 (у чотири рази менше); США – 0,054 (у три рази менше) [2]. Проведені дослідження підтверджують той факт, що в нашій країні особливо високим є рівень травматизму виробничого і невиробничого характеру [4].

Водночас, на нашу думку, надважливим є той факт, що в Україні рівень цього показника виробничої діяльності підприємств протягом останніх років має постійну тенденцію до активного підвищення (рис. 1, 2).

Незадовільним нині є також і стан травматизму в нашій країні в галузі освіти, тобто серед працівників, які працюють у

закладах освіти, і здобувачів освітніх послуг [5]. Це викликане тим, що за час агресії проти України, що призвела до виникнення надзвичайної ситуації воєнного характеру, спостерігають зниження рівня безпечного освітнього середовища. Цей процес спровокований і значним руйнуванням закладів освіти, змінами у формі надання освітніх послуг.

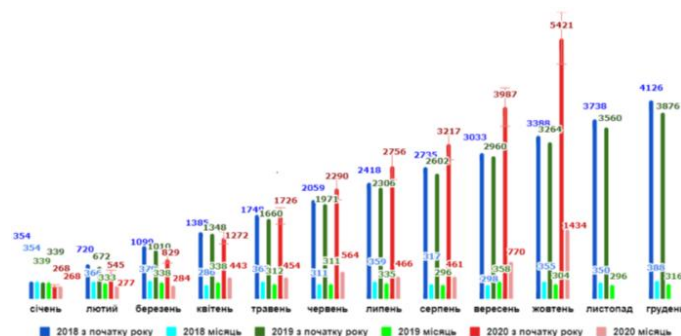


Рис. 1. Динаміка зміни рівня виробничого травматизму в Україні за 2018-2020 рр.

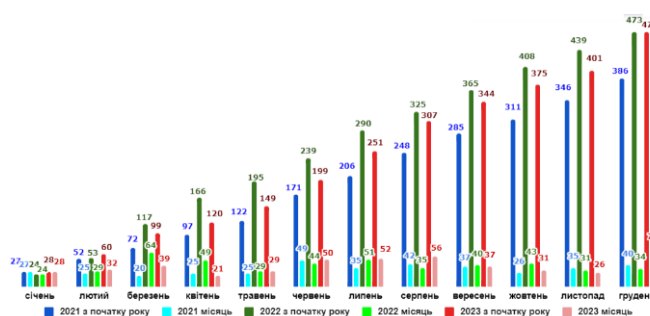


Рис. 2. Динаміка зміни рівня виробничого травматизму в Україні за 2021-2023 рр.

Так, за офіційною інформацією органів управління освітою, в обласних центрах, Київській області у фахових закладах вищої та передвищої освіти, що належать до сфери керування МОН України, протягом 2023 р. серед працівників, які працюють у закладах освіти, і здобувачів освіти зафіксовані такі ситуації [5]: зі здобувачами освіти безпосередньо під час освітнього процесу виникло 3879 нещасних випадків (у тому

числі зі смертельними наслідками – 9 випадків); зі здобувачами освіти в побуті сталося 395 нещасних випадків (невиробничого характеру); серед працівників закладів освіти виникло 139 нещасних випадків на виробництві. При цьому зафіксовано вісім випадків зі смертельними наслідками.

Високий рівень мають захворювання і травматизм невинного й побутового характеру, тобто в системі «людина –

невиробниче, побутове середовище». При цьому є характерним, що не тільки в Україні, а й в усьому світі кількість травм, які стаються поза виробничим середовищем, значно перевищує сукупність травм, що виникають у системі «людина – виробниче середовище». Так, за даними ДСНС України, тільки за 2019 р. зареєстровано більше 1 млн 600 тис. нещасних випадків невинного, зокрема побутового характеру (на сьогодні дані відсутні) [6]. За висновками ВООЗ (Всесвітня організація охорони здоров'я), нині рівень смертності, спровокованої нещасними випадками, займає третє місце після смертності від онкологічних і серцево-судинних захворювань [2, 3]. Тобто наявна ситуація, статистичні дані з аналізованих показників безпеки життєдіяльності людини формує висновок, що на поточний період часу рівень травматизму виробничого і невинного (у тому числі побутового) характеру може бути прирівняний до епідемії [2, 3].

Статистичний аналіз причин нещасних випадків, які виникають у виробничій і невинній сферах, показує, що ризики реалізовані в більшості випадків з таких причин: недостатні знання та низька відповідальність працівників щодо додержання правил безпечного виконання робіт; відсутність у значної кількості населення знань про можливі небезпеки в разі перебування за межами системи «людина – виробниче середовище».

Отже, виходячи з наведених даних і беручи до уваги соціально-економічні та демографічні проблеми, що спостерігаються на сучасному етапі розвитку нашої країни, завдання збереження життя й здоров'я людини не тільки в системі «людина – виробниче середовище», а і системі «людина – невинне, побутове середовище» має особливо актуальне значення.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою досліджень є визначення основних шляхів, реалізація

яких дасть можливість вирішити поставлене завдання з підвищення рівня безпеки життєдіяльності в аналізованих системах.

Завданням дослідження є виявлення основних причин, що викликають значне зниження рівня безпеки життєдіяльності населення нашої держави в результаті значного зростання кількості нещасних випадків у системах «людина – невинне, побутове середовище» й «людина – виробниче середовище».

Основна частина дослідження. З урахуванням надзвичайної ситуації воєнного характеру розглядувані актуальні проблеми були основним предметом для розроблення офіційного документа «Безпека й здоров'я на роботі у воєнний та післявоєнний час: досвід України в умовах російської агресії» [7]. В основних його положеннях зазначено, що завдання забезпечення безпеки, збереження здоров'я працівників у виробничій сфері навіть за мирного часу потребує значних зусиль, тому що необхідно постійно вдосконалювати й запроваджувати сучасні методи управління, технологічні процеси, обладнання тощо. За умов воєнного стану завдання ефективного, зокрема безпекового функціонування підприємств, охорони праці працівників значно ускладнено. Це обумовлено появою додаткових зовнішніх небезпечних факторів, психологічним станом працівників. Унаслідок цього підвищується ризик виникнення нещасних випадків у сфері виробництва, переважно таких, які не є характерними за умов мирного часу. До базових рекомендацій цього документа входить необхідність розроблення стратегії вдосконалення *комплексної системи навчання*, спрямованої на забезпечення безпеки працівників, з подальшою її практичною реалізацією.

У нашій країні акцент на проблему травматизму невинного характеру, тобто в системі «людина – невинне, побутове середовище», був встановлений починаючи з 2007 р. З метою вирішення цієї проблеми на державному рівні була

визначена політика держави, розроблено основні шляхи її реалізації через профілактику травматизму. Ці положення були викладені в Концепції проекту Закону України «Про основні засади державної політики у сфері профілактики травматизму невиробничого характеру» [8]. Виходячи зі статистичних даних встановлено факт про критичний стан невиробничого травматизму. Тому в Концепції визначено цю проблему як економічну й соціально-політичну з тієї причини, що вона не тільки призводить до занадто значної кількості постраждалих, а й негативно впливає на такі важливі складові життєдіяльності країни: демографічні процеси, що на сьогодні є проблемою нашої держави; інтенсивність виникнення кризових виробничих ситуацій, значно збільшуючи їхню кількість; рівень економічного збитку, який одержує держава в разі нещасних випадків із причини дії комплексу супутніх факторів (наприклад втрати робочого часу за нещасних випадків побутового характеру, фінансові виплати постраждалим тощо). Так, на 2007 р. такі державні збитки склали більше 10 млрд грн [8].

За Концепцією, серед комплексу основних засад, пріоритетних завдань політики держави, ураховуючи базову спрямованість – вирішення аналізованої проблеми через профілактику травматизму в системі «людина – невиробниче середовище», визначено освіту. Водночас прописано, що освіта громадян України має виховувати й формувати у свідомості кожного індивідуума культуру безпеки, знання, уміння та навички її забезпечення, причому елементи освітнього процесу мають бути побудовані так, щоб у результаті виховувати як рису характеру індивідуума важливість забезпечення не тільки безпеки особистості, але й безпеки людей усього суспільства. У переліку основних шляхів, заходів, зазначених у цьому законодавчому акті, визначено, що забезпечення реалізації державної політики у вирішенні розглядуваної проблеми має відбуватися через освіту, тобто за рахунок

впровадження, вдосконалення та забезпечення безперервного постійного навчання всього населення з безпеки життєдіяльності, охорони праці, цивільного захисту. Особливо актуальною є проблема збереження здоров'я, життя людини в системах «людина – невиробниче середовище», «людина – виробниче, побутове середовище» в умовах теперішнього воєнного стану. Це визначено тим, що для нинішніх умов життєдіяльності, на відміну від умов мирного часу, характерно ризик ураження людини за бомбардувань, обстрілів, від вибухових пристроїв, а також зростання соціально-політичних небезпек.

На сьогодні безпекові дисципліни «Безпека життєдіяльності», «Основи охорони праці» та «Охорона праці в галузі» і «Цивільний захист» у деяких ЗВО мають тенденцію до об'єднання, тобто інтегрування дисциплін. Це призвело до значного скорочення часу на викладання матеріалу, що, як наслідок, знижує якість надаваних освітніх послуг із цих дисциплін у сфері безпеки людини, охорони праці, цивільного захисту [9-11]. Тобто обсяг, якість одержуваних знань з їх вивченням оцінюють як недостатній, що негативно позначається не тільки в подальшій виробничій діяльності, а і з перебуванням осіб у системі «людина – невиробниче, побутове середовище».

Висновки. У результаті проведених досліджень виявлено загрозливий сучасний стан із побутовим і виробничим травматизмом. Таке положення має суттєвий негативний вплив не тільки на трудовий потенціал нашої держави, її економічний розвиток, а і демографічну ситуацію. Це посилюється воєнною надзвичайною ситуацією в Україні. У результаті досліджень законодавчих актів, офіційних звітних, рекомендаційних документів у зарубіжних країнах і Україні виявлено, що однією з головних причин незадовільного безпекового стану є недостатній рівень, якість освіти в цій галузі.

Список використаних джерел

1. ВООЗ: тисячі людей в Україні зазнали складних травм, пов'язаних із війною. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-vooz-ukraintsi-travmy-viyna/32307361.html>.
2. Охорона праці. Світова статистика. https://www.ilo.org/moscow/areas-of-work/occupational-safety-and-health/WCMS_249276/lang--ru/index.htm.
3. Доповідь Міжнародної організації праці до Всесвітнього дня охорони праці. 2021. https://www.ilo.org/budapest/what-we-do/projects/declared-work-ukraine/WCMS_783701/lang--en/index.htm.
4. Серіков Я. О., Нікітченко О. Ю., Серікова К. С. Стан та проблеми виробничого й побутового електротравматизму в Україні. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2021. Вип. 4 (164). С. 234-239. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5844/5763>.
5. Міністерство освіти і науки України. Про стан травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти за 2023 рік: Лист МОН № 1/6067-24 від 08.04.24 р. URL: <https://osvita.ua/legislation/other/91853/>.
6. Інформаційно-аналітична довідка про стан травматизму невиробничого характеру в Україні за 12 місяців 2019 р. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/9/2/3/3/2020-10-7-3-inf-analit-dovidka-12-misyaciv-2019-r.pdf>.
7. Безпека і здоров'я на роботі у воєнний та післявоєнний час. Досвід України в умовах російської агресії / Держпраці України, European Society of Occupational safety @ health (ESOSH). URL: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---europe/---ro-geneva/---sro-budapest/documents/genericdocument/wcms_856143.pdf.
8. Про Основні засади державної політики у сфері профілактики травматизму невиробничого характеру: концепція проекту Закону України 2009. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/632-2009-%D1%80#Text>.
9. Запорожець О. І. Криза освіти і культура безпеки життєдіяльності людини. *Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука, практика: Матеріали IX Міжнар. наук.-метод. конференції*. Львів: ЛНУ, 2010. С. 24-28.
10. Кучменко О., Немченко Ю. Викладання безпекових дисциплін в умовах війни. *Матеріали III Всеукр. наук.–практ. конф. пам'яті академіка АНБОУ проф. А. В. Касперського «Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загальнотехнічних та безпекових наук»*. Київ: УДУ ім. М. Драгоманова, 2023. С. 235-237. https://kztdop.ipf.npu.edu.ua/images/Science/KAV_Conferenc/2023/InfoList.pdf.
11. Серіков Я. О. Завдання формування безпечного життєвого й виробничого простору людини в процесі викладання безпекових дисциплін у закладах вищої освіти. *Матеріали Міжнар. наук-практ. конф. «Стан, проблеми та перспективи розвитку науки, освіти і технологій» (м. Кременчук: ЦФЕНД, 29 серпня 2023 р.)*. 2023. С. 54-56. URL: <https://www.economics.in.ua/2023/08/29-2023.html>.

Серіков Яків Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3463-2079. Тел.: 0509088828. E-mail: s0509088828@gmail.com.

Брусенцов Віталій Гаврилович, доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7003-9889. Тел.: 0662955229. E-mail: brusencov.vitaly@gmail.com.

Данова Карина Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-1994-703X. Тел.: 0995288266. E-mail: bgd204@yahoo.com.

Герасименко Віталій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри світлотехніки та джерел світла, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова.
ORCID iD: 0000-0002-0390-289X. Тел.: 0993883028. E-mail: Twixvi@gmail.com.

Гаряжа Олексій Васильович, начальник навчально-методичного відділу, підприємство «Східний експертно-технічний центр Держпраці». Тел.: +380680226833. E-mail: vostetc@gmail.com.

Логвінков Сергій Михайлович, доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова.
ORCID iD: 0000-0001-5957-2386. Тел.: 0509088828, E-mail: s0509088828@gmail.com.

Serikov Yakiv Oleksandrovich, Cand. technical of Science, Assoc. Department of Occupational Safety and Health, Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketova. ORCID iD: 0000-0002-3463-2079.
Tel. 0509088828. E-mail: s0509088828@gmail.com.

Brusentsov Vitaly Havrylovich, Dock. technical of Science, Assoc. Department of Labor and Environmental Protection. Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7003-9889. Tel. 0662955229.
E-mail: brusencov.vitaly@gmail.com.

Danova Karina Valerievna, Cand. technical of Science, Assoc. Department of Occupational Safety and Health. Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketova. ORCID iD: 0000-0002-1994-703X.
Tel. 05090888. E-mail: s0509088828@gmail.com.

Gerasimenko Vitaly Anatoliyovych, Cand. technical of Science, Assoc. Department of Occupational Safety and Health. Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketova. ORCID iD: 0000-0002-0390-289X.
Tel. 05090888. E-mail: s0509088828@gmail.com.

Gharyazha Oleksiy Vasylyovych, Head of the educational and methodological department of the enterprise "Eastern expert and technical center of farm work". Tel. 0680226833. E-mail: vostetc@gmail.com.

Logvinkov Sergey Mykhailovych. Dock. technical Sciences, Prof. Department of Occupational Safety and Health. Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketova. ORCID iD: 0000-0001-5957-2386.
Tel. 0509088828. E-mail: s0509088828@gmail.com

Статтю прийнято 02.02.2025 р.

УДК 629.4.083:629.45

ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ З УРАХУВАННЯМ НАДІЙНОСТІ ЙОГО КОМПОНЕНТІВ

**Кандидати техн. наук В. В. Бондаренко, Р. І. Візніак,
д-р техн. наук В. Г. Равлюк, канд. техн. наук Д. І. Скуріхін,
студ. С. В. Бондаренко**

DIAGNOSTICS OF ELECTRONIC EQUIPMENT OF PASSENGER CARS BASED ON COMPONENT RELIABILITY ASSESSMENT

**PhD (Tech.) V. V. Bondarenko, PhD (Tech.) R. I. Vizniak,
Dr. Sc. (Tech.) V.G. Ravlyuk, PhD (Tech.) D. I. Skurikhin,
student S. V. Bondarenko**

***Анотація.** Підвищення експлуатаційної готовності пасажирських вагонів і зменшення тривалості їхнього простою можна досягти за рахунок скорочення часу визначення працездатності електронного обладнання і пошуку місця відмови в його електронних компонентах. Ця проблема може бути вирішена шляхом проведення досліджень, розроблення та впровадження прогресивних методик оцінювання надійності, а також методів і засобів*

технічного діагностування електронного обладнання пасажирських вагонів. У роботі розраховано проєктну надійність електронного обладнання пасажирських вагонів, що входить до складу пультів керування пасажирських вагонів. Запропоновано алгоритм діагностування, що враховує отримані розрахунком показники надійності електронних блоків вагона, час діагностування компонентів і визначає послідовність діагностування електронної апаратури за розрахованим критерієм пріоритетності.

Ключові слова: діагностування, надійність, електронне обладнання, пасажирський вагон, готовність вагонів, електричне обладнання, інтенсивність відмов, алгоритм діагностування, контроль технічного стану, пошук несправностей, критерій пріоритетності.

Abstract. As is known, one of the critical challenges in Ukraine's railway transport sector in recent years has been ensuring the reliability of passenger cars. Increasing train speeds, enhancing safety levels, and meeting higher passenger comfort requirements necessitate ensuring high operational reliability of passenger cars. Reducing passenger car downtime and improving their operational readiness can be achieved by minimizing the time required to assess the operability of electronic equipment and locate failures within its electronic components. This issue can be addressed by conducting research, developing, and implementing advanced methods for reliability assessment, as well as technical diagnostic methods and tools for passenger car equipment. The authors of this article have developed a methodology for assessing the design reliability of passenger car electronic equipment. Using this methodology, a study was conducted on the design reliability of automation devices integrated into passenger car control panels. The reliability of the electronic equipment was standardized, and reliability parameters were calculated considering operational coefficients. A modern passenger car is a complex engineering system, consisting of a combination of mechanical, electronic, and electrical systems. Up to 75 % of the total repair time for systems is spent on fault localization in complex radio-electronic systems, including preparation for fault detection. The most critical automation devices include the electronic blocks of the generator voltage regulator, frequency relay, battery charge control, and protection units. Therefore, when troubleshooting and monitoring operability, it becomes crucial to determine the most optimal sequence of operations, ensuring the shortest possible verification time for electrical equipment. The research results can significantly reduce the time required to locate faults in the electronic blocks of passenger cars, thus enhancing their reliability and operational readiness. Based on the calculated reliability parameters of the car's electronic blocks, a new diagnostic technology has been proposed. This technology considers the calculated reliability parameters, the time required for diagnosing components, and determines the optimal sequence for diagnosing electronic equipment according to a calculated priority criterion.

Key words: diagnostics, reliability, electronic equipment, passenger car, car readiness, electrical equipment, failure rate, diagnostics algorithm, technical condition control, troubleshooting, priority criterion.

Вступ. Як відомо, останнім часом на залізничному транспорті України однією з важливих є проблема надійності пасажирських вагонів. Через дію воєнного стану та складну економічну ситуацію у країні фінансування на придбання нових пасажирських вагонів для залізниць України значно зменшилося, також значна

кількість вагонів інвентарного парку відпрацювала свій ресурс. Ураховуючи незадовільний стан парку пасажирських вагонів, особливо вагонів відкритого типу, у роботі наведено результати досліджень, спрямованих саме на підвищення їхньої експлуатаційної надійності, готовності та зменшення часу на їх діагностування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними останніх досліджень, ступінь зносу пасажирських вагонів становить 88-93 %. Його старіння дуже швидко і не компенсовано надходженням нових вагонів. За статистичними даними, структура інвентарного парку пасажирських

вагонів філіалу «Пасажирська компанія» АТ «Укрзалізниця» дуже змінилася за останні роки. В основному закуповують вагони чотирьох типів: вагони пасажирські відкритого типу, спальні, купейні та міжобласні/денні (рис. 1).



Рис. 1. Структура загального парку пасажирських вагонів (а) і парку пасажирських вагонів за видами (б)

Найбільшу питому вагу у структурі парку пасажирських вагонів мають вагони відкритого типу (пляцкартні вагони ЦМО – 32,96 %); купейні (ЦМК – 31,76 %) і спальні (СВ – 4,32 %). Вагони відкритого типу на сьогодні найбільше експлуатують із відпрацьованим нормативним строком служби [2, 10]. Ураховуючи незадовільний стан парку пасажирських вагонів, особливо відкритого типу, у роботі наведено результати досліджень, спрямованих саме на підвищення їхньої готовності та зменшення часу на їх діагностування. Найбільша кількість пасажирських вагонів обладнані комплексами електрообладнання типу ЭВ.10.02, ЭПВ.10 та ін., до складу яких входить складна електронна апаратура автоматичного керування, контролю і захисту та велика кількість споживачів.

З відновленням електрообладнання значну частину часу витрачають на пошук несправності та контроль працездатності. За останніми даними, на пошук несправності у складних радіоелектронних системах разом із підготовкою до пошуку витрачають

близько 75 % загального часу ремонту систем. Тому з пошуком несправності та контролем працездатності виникає завдання визначення найбільш раціональної послідовності операцій, що забезпечила б перевірку електрообладнання в найкоротший час. Використання результатів досліджень дасть змогу зменшити час на пошук несправностей в електронних блоках вагонів, а також підвищити надійність і готовність вагонів до експлуатації.

Проблемам забезпечення надійності рухомого складу залізниць і діагностування технічного стану вагонів присвячені такі роботи: [1] – аналіз взаємозв'язку між надійністю і безпечністю спеціалізованих комп'ютерних систем залізничної автоматики з ретельним аналізом як апаратних, так і програмних заходів підвищення безпечності компонентів і систем; проблемам підвищення надійності вагонів конструктивними методами, а також випробування апаратури керування та регулювання руху поїздів присвячені роботи [3-7, 14-21]. У той же час у цих

роботах завдання надійності електронної апаратури пасажирських вагонів не розглянуто. Аналіз методик, використовуваних останнім часом для розрахунку надійності систем залізничної автоматики з електронними компонентами, наведений у роботі [8]. Основні загальні поняття надійності визначені державними стандартами України [11-13]. Однак у наукових працях і методиках, наведених вище, не розглянуто розрахунок проєктної надійності електронних блоків вагонів та особливості їхньої роботи з урахуванням експлуатаційних факторів. Також не розглянуто оптимальні алгоритми діагностування, що враховують надійність електронної апаратури вагонів.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення оптимального алгоритму діагностування з мінімальним часом перевірки електронного обладнання пасажирських вагонів, що враховує

надійність його компонентів і пріоритетність діагностування обладнання.

Основна частина дослідження. З метою вирішення проблеми зменшення часу для діагностування електронної апаратури пасажирських вагонів проведено розрахунок проєктної надійності електронних блоків вагона. Визначені з розрахунком показники надійності надалі використані для створення раціонального алгоритму діагностування.

Електрообладнання сучасного пасажирського вагона є різноманітним і складним за своєю будовою. Існує багато видів і модифікацій комплексів електрообладнання вітчизняного та закордонного виробництва. На рис. 2 зображено пульт керування та електронні блоки одного з відомих комплексів електрообладнання ЭВ.10.02, встановлені на багатьох пасажирських вагонах відкритого типу.



Рис. 2. Пульт керування (а) та електронні блоки (б) пасажирського вагона

Комплекси електрообладнання постійно оновлюють і вдосконалюють. На вітчизняних пасажирських вагонах прискореного руху використовують більш сучасні розподільні щити систем автоматизованого керування, контролю і діагностики (ШР САУКД), побудовані в НПП «Хартрон-Експрес». Також проходять модернізацію комплекси ЭВ.10.02 і замінюють на ЭВН 10.003 для використання

у складі некупейного пасажирського залізничного вагона, які проходять капітальні види ремонту. Усі сучасні системи електрообладнання, використовувані на залізницях України, структуровані та наведені в роботі [9].

Методика розрахунку проєктної надійності електронних блоків вагона

Уся електронна апаратура вагона виконана за блоковим принципом і залежно

від функціонального призначення поділяється на такі основні блоки: блок захисту (БЗ), блок регулятора напруги генератора (БРНГ), блок реле частоти (БРЧ) і блок реле температури (БРТ). Інші електронні блоки мають другорядне значення в системі електрообладнання вагона, тому оцінювали надійність вищевказаних чотирьох блоків.

Визначаючи надійність електронних блоків, необхідно розрізняти проєктну надійність, тобто розраховану теоретично за даними інтенсивності відмов елементів, та експлуатаційну надійність, визначену для умов експлуатації вагона з урахуванням реальних режимів навантаження. Дослідження експлуатаційної надійності електронної апаратури вагона пов'язані з великими труднощами, оскільки апаратура має порівняно невеликий відсоток відмов в експлуатації. У зв'язку з цим оцінювання надійності потребує проведення тривалих спостережень за сукупністю вагонів в експлуатації. Через це на першому етапі вважаємо за необхідне теоретично оцінити проєктну надійність електронних блоків, а далі, за наявності статистики відмов блоків в експлуатації, порівняти проєктну (розраховану теоретично) та експлуатаційну надійність.

Електрообладнання пасажирського вагона являє собою постійно діючу апаратуру, відновлювану за результатами перевірок. У технічних умовах на комплекс електрообладнання ЭВ.10.02 вимоги щодо надійності сформульовані так: середній наробіток до відмови – не менше 610000 км; коефіцієнт готовності – не менше 0,99; термін служби – не менше 20 років; встановлений безвідмовний наробіток протягом шести місяців із початку експлуатації – не менше 400000 км. Як основний показник, що характеризує безвідмовність електрообладнання вагона як заданий показник, – середній наробіток до відмови. Він нормований за елементами, що входять до складу вагона.

Оцінюючи показники надійності електронних блоків, доцільно виділити два основних етапи: нормування надійності та розрахунок надійності.

Нормування надійності дає змогу визначити кількісне значення середнього наробітку до відмови, що припадає на блоки сумарно із загального значення показника, заданого на все електрообладнання вагона, тобто провести нормування надійності. Вихідними даними для нормування і розрахунку проєктної надійності електронних блоків були:

- структурні схеми надійності блоків БЗ, БРНГ, БРЧ і БРТ;
- переліки ЕРВ (електро-радіо виробів), що входять до складу блоків;
- переліки інтенсивності відмов використаних ЕРВ;
- режими й умови роботи блоків.

Інтенсивності відмов ЕРВ визначені з урахуванням коефіцієнтів впливу на інтенсивність відмов різних конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів, що впливають на електронні блоки вагона.

Відповідно до призначення й умов експлуатації електронні блоки належать до категорії 1.2 (наземна рухома апаратура). Інтенсивність відмов комплектування ЕРВ для цієї категорії визначають за формулою

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \prod_{K=1}^n K_k, \quad (1)$$

де λ_0 – базова інтенсивність відмов ЕРВ за $t = + 25^\circ\text{C}$;

K_k – коефіцієнти, що враховують вплив на інтенсивність відмов ЕРВ різних конструктивно-технологічних і експлуатаційних факторів.

В основу розрахунку показників надійності електронних блоків покладено імовірнісний метод кількісного оцінювання надійності. При цьому існує припущення, що час виникнення відмов підлягає експоненційному закону розподілу, для

якого справедлива умова $\lambda(t) = \text{const}$, тобто інтенсивність відмов постійна в часі. Для нерезервованої апаратури, до якої належать електронні блоки, середній наробіток до відмови T_c визначають за формулою

$$T_c = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n N_{ji} \cdot \lambda_{ji}}, \quad (2)$$

де n – кількість типів ЕРВ, що входять у j блок;

m – кількість блоків;

N_{ji} – кількість ЕРВ i -го типу, що належать j -му блоку;

λ_{ji} – інтенсивність відмов ЕРВ i -го типу, що належать j -му блоку.

Розраховують показник надійності T_c відповідно до структурних схем надійності (ССН) кожного з електронних блоків і їхніх компонентів. Так, ССН блока БРЧ зображена на рис. 3, інші схеми побудовані аналогічно.

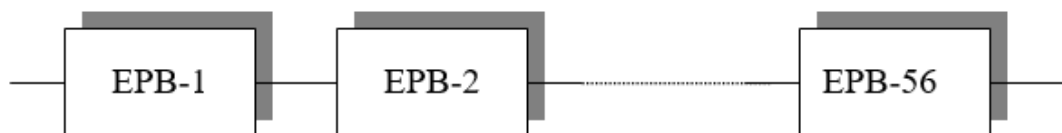


Рис. 3. Структурна схема надійності блока БРЧ

Діагностування електронних блоків вагона з урахуванням їхньої надійності

На підставі розрахунку інтенсивності відмов електронних блоків можна розробити алгоритм послідовності їх діагностування, який може бути корисним для технічного обслуговування та ремонту електрообладнання вагонів і зменшити час на відновлення вагонів в експлуатації.

Алгоритм 1. Для послідовної перевірки в порядку зменшення ймовірності відмови спочатку перевіряють елемент, імовірність відмови якого максимальна. Якщо він справний, то перевіряють наступний і так далі. У цьому випадку середня кількість і час перевірок значно скорочуються. Цей алгоритм часто інтуїтивно використовують техніки та механіки на практиці з пошуком відмов, але він потребує розрахункового оцінювання.

Ураховуючи розраховану надійність електронних блоків, діагностування та контроль має відбуватись у порядку збільшення їхньої надійності: БРЧ, БЗ, БРТ, БРНГ (від менш надійного блока до більш надійного).

Алгоритм 2. Можна вдосконалити вищезазначений алгоритм і зменшити час пошуку відмови, урахувавши не тільки ймовірність відмови, а й час на її пошук. Принцип дії алгоритму такий. Нехай маємо систему, яка складається з (N) елементів, один із яких має відмову, імовірності відмов (q_i) елементів і час перевірки (t_i) кожного елемента позначимо відповідно як $(q_1, t_1, q_2, t_2, \dots, q_N, t_N)$.

Якщо вибирають послідовність перевірок елементів послідовно, відповідно до їхньої нумерації, то математичне сподівання часу пошуку відмови буде

$$M_1 = q_1 t_1 + q_2 (t_1 + t_2) + q_3 (t_1 + t_2 + t_3) + \dots + q_N (t_1 + t_2 + \dots + t_N). \quad (3)$$

Якщо вибрано іншу послідовність перевірок, наприклад $(2, 1, 3, 4, \dots, N)$, то математичне сподівання часу пошуку відмови буде

$$M_2 = q_2 t_2 + q_1(t_1 + t_2) + q_3(t_1 + t_2 + t_3) + \dots + q_N(t_1 + t_2 + \dots + t_N). \quad (4)$$

Перша програма буде ефективнішою за другу, якщо $M_1 - M_2 < 0$, або

$$q_1 t_1 + q_2(t_1 + t_2) + \dots + q_N(t_1 + t_2 + \dots + t_N) < q_2 t_2 + q_1(t_1 + t_2) + \dots + q_N(t_1 + t_2 + \dots + t_N). \quad (5)$$

Отже, оптимальну послідовність перевірок має задовольняти нерівність

$$\frac{q_1}{t_1} > \frac{q_2}{t_2} > \frac{q_3}{t_3} > \dots > \frac{q_N}{t_N}. \quad (6)$$

Це означає, що елементи слід упорядкувати за зменшенням критерію пріоритетності K_i , який ураховує ймовірність відмови та час перевірки елемента:

$$K_i = \frac{q_i}{t_i}, \quad (7)$$

де q_i – ймовірність відмови i -го елемента;
 t_i – час перевірки i -го елемента.

Ураховуючи відому нам інтенсивність відмов електронних блоків, кількість необхідних перевірок і час на кожну перевірку, отримаємо критерій пріоритетності для i -го електронного блока вагона:

$$K_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^{n_i} t_{ij}}, \quad (8)$$

де K_i – критерій пріоритетності для i -го електронного блока;

λ_i – інтенсивність відмови i -го блока;

n_i – кількість параметрів для перевірки в i -му блоці;

t_{ij} – час перевірки j -го параметра в i -му блоці.

Результати дослідження.

Розрахунками встановлено (на основі формул (1) і (2) і структурних схем надійності), що найменш надійним є блок БРЧ ($\lambda = 1,69071 \cdot 10^{-6} \text{1/год}$), далі в порядку збільшення надійності йдуть блоки БЗ ($\lambda = 1,39393 \cdot 10^{-6} \text{1/год}$), БРТ ($\lambda = 0,85222 \cdot 10^{-6} \text{1/год}$), БРНГ ($\lambda = 0,71097 \cdot 10^{-6} \text{1/год}$). Сумарна інтенсивність відмов усіх електронних блоків складає $4,6956 \cdot 10^{-6} \text{1/год}$. Розраховане значення середнього наробітку до відмови $T_c = 212965 \text{ год}$ і нормоване значення $T_c = 200000 \text{ год}$ практично рівні (із довірчою ймовірністю 0,9). Проведені розрахунки доводять коректність запропонованої методики розрахунку. Визначення надійності електронного обладнання вагонів дасть змогу оцінити його залишковий ресурс і впливати на надійність конструктивними або експлуатаційними методами, зокрема методами діагностики.

Оптимальна послідовність перевірки електронних блоків, отримана за результатом розрахунку критерію пріоритетності K_i у порядку його зменшення (за формулою (8)) така: БРЧ ($K_{\text{БРЧ}} = 3,97675 \times 10^{-8}$); БРНГ ($K_{\text{БРНГ}} = 1,4194 \times 10^{-8}$); БЗ ($K_{\text{БЗ}} = 1,02562 \times 10^{-8}$); БРТ ($K_{\text{БРТ}} = 8,522 \times 10^{-9}$) (рис. 4).

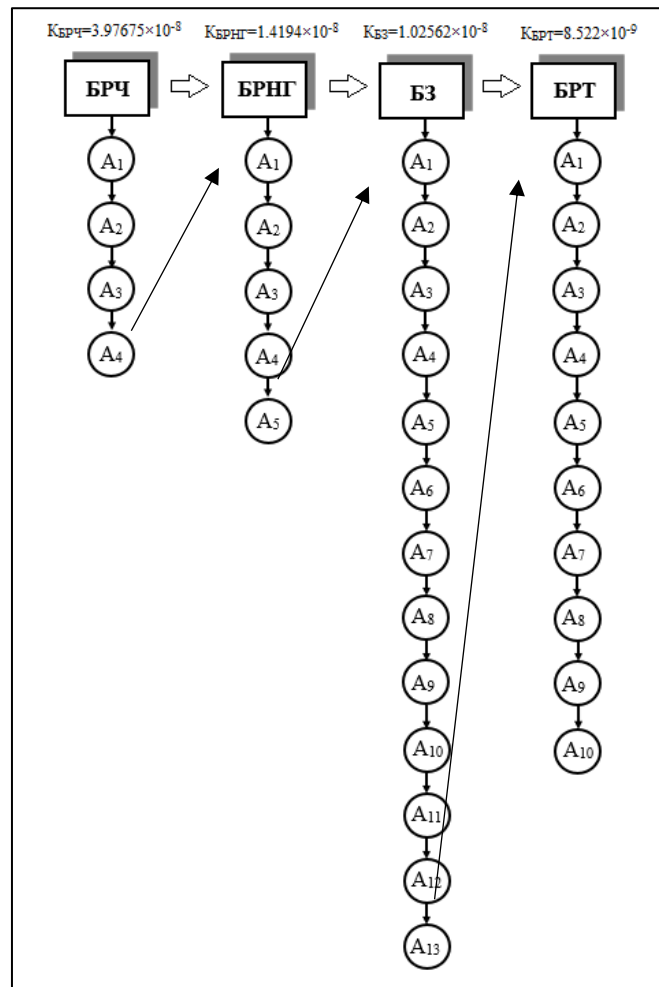


Рис. 4. Алгоритм діагностування електронних блоків вагона за критерієм пріоритетності

На рисунку БРЧ, БРНГ, БЗ, БРТ – електронні блоки, що підлягають діагностуванню; $A_1 \div A_{32}$ – перелік параметрів електронних блоків, що підлягають контролю за прийнятою методикою випробувань заводу-виробника. Електронний блок БРЧ із більшим значенням критерію пріоритетності слід перевіряти першим, оскільки це забезпечує мінімальне математичне сподівання часу перевірок, далі йдуть БРНГ, БЗ та БРТ. Отже, упорядковуючи блоки за спаданням критерію пріоритетності K_i , одержимо мінімальне математичне сподівання часу перевірок. Це дає змогу ефективно організувати діагностування, скоротивши середній час пошуку відмов, зменшити час відновлення комплексу електрообладнання

вагона та підвищити експлуатаційну готовність вагона в цілому.

Висновки. Розроблено методику розрахунку проєктної надійності електронної апаратури пасажирських вагонів, у рамках якої проведено нормування надійності електронних блоків і розраховано параметри надійності з урахуванням експлуатаційних коефіцієнтів. На базі цієї методики запропоновано алгоритм діагностування електрообладнання вагона, який урахує отримані розрахунком показники надійності електронних блоків вагона, час на діагностування компонентів і визначає послідовність діагностування електронної апаратури за розрахованим критерієм пріоритетності кожного блока.

Список використаних джерел

1. Мойсеєнко В. І., Бутенко В. М. Безпечність спеціалізованих комп'ютерних систем: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 112 с.
2. Лупітько Н. В., Сладких І. В. Дослідження сучасного стану інвентарного парку пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця». *Рейковий рухомий склад: зб. наук. праць*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ». 2020. Вип. 21. С. 28-43.
3. Проблеми випробувань комплексів технічних засобів керування та регулювання руху поїздів / В. І. Мойсеєнко, В. М. Бутенко, О. В. Головка, С. Г. Чуб. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 3. С. 31–38. ISSN: 2413-3833.
4. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V. The service life prediction for brake pads of freight wagons. *Communications. Scientific Letters of the University of Zilina*. 2024. Vol. 26 (2). P. B80 – B89. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.017>.
5. Development of a Procedure for Determining the Pre-Failure Condition of the Axle Boxes of Railway Rolling Stock / Martynov I., Gerlici J., Trufanova A., Petuhov V., Shovkun V., Kravchenko K. *Komunikácie - vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline*. 2022. 24(1). P. B87-B93. DOI: 10.26552/com.C.2022.1.B87-B93.
6. Пасажирські вагони. Діагностування. Залишковий ресурс. Надійність: монографія / Ю. Я. Водянніков, А. О. Сулим, П. О. Хозя та ін. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2023. 69 с.
7. Panchenko S., Vatulia G., Lovska A., Ravlyuk V., Elyazov I., Huseynov I. Influence of structural solutions of an improved brake cylinder of a freight car of railway transport on its load in operation. *EUREKA Phys. Eng.* 2022. 6. 45–55. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002638>.
8. Бутенко В. М., Головка О. В., Чуб С. Г. Аналіз методик розрахунку надійності систем залізничної автоматики з електронними компонентами. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2023. Вип. 204. С. 115-124.
9. Bondarenko V., Skurikhin D., Wojciechowski J. The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development. *Smart and Green Solutions for Transport Systems: 16th Scientific and Technical Conference «Transport Systems. Theory and Practice 2019» Selected Papers.*-Katowice: Springer International Publishing. 2020. P. 114-125. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35543-2_10.
10. Прес-служба «Укрзалізниця». 62 % пасажирських вагонів України не обладнані кондиціонерами. URL: https://www.uz.gov.ua/press_center (дата звернення 01.11.2024).
11. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994.
12. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Київ: Держстандарт України, 1994.
13. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Київ: Держстандарт України, 1994.
14. Bondarenko V. V., Skurikhin D. I., Vizniak R. I., Ravlyuk V. H., Skurikhin V. I. Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 4. P. 30–36. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/7>.
15. Ravlyuk V., Ravliuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Research of the calculation scheme for the brake lever transmission and construction of the load model for the brake pads of freight cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. TRANSBUD-2019. С. 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012026>.
16. Ravlyuk V., Ravliuk M., Hrebenuk V., Bondarenko V. Process features and parametric assessment of the emergence of the excessive wear for the brake pads of freight car bogies. *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering. TRANSBUD-2019. С. 012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012025>.

17. Martynov I., Bondarenko V., Skurikhin D. Mathematical modeling of oscillations wheelset as the basis of the method of acoustic control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. № 7. P. 22-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.20088.

Бондаренко В'ячеслав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017. Тел.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Візняк Руслан Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981. E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua.

Равлюк Василь Григорович, д-р техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482. E-mail: ravvg@kart.edu.ua

Скуріхін Дмитро Ігорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3746-5157. E-mail: skurikhin@kart.edu.ua.

Бондаренко Сергій В'ячеславович, студент, Технологіко-гуманітарний університет ім. К. Пулавського (Радом, Польща). ORCID iD: 0009-0004-6938-4046. E-mail: serbon2007@gmail.com.

Bondarenko Viacheslav, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017. Tel.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Viznyak Ruslan, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981. E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua.

Ravlyuk Vasyl, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482. E-mail: ravvg@kart.edu.ua.

Skurikhin Dmytro, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-3746-5157. E-mail: skurikhin@kart.edu.ua.

Bondarenko Serhii, student, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Poland. ORCID iD: 0009-0004-6938-4046. E-mail: serbon2007@gmail.com.

Статтю прийнято 10.02.2025 р.

УДК 656.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗА ПОВТОРНО-КОРОТКОЧАСНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА ДІЛЯНКАХ РІЗНОГО ПРОФІЛЮ

Асп. В. М. Ляшенко, канд. техн. наук С. І. Яцько

STUDY OF THE POWER CONSUMPTION OF ELECTRIC ROLLING STOCK OPERATING WITH REPEATED SHORT-TIME TRACTION CYCLES

Postgraduate student V. M. Lyashenko, PhD (Tech.) S. I. Yatsko

Анотація. Стаття присвячена розгляду питань оптимізації енергетичних витрат на системах рейкового транспорту. Ця проблема ускладнена невизначеністю щодо умов експлуатації та характеристик електрорухомого складу, що працює в повторно-короткочасному режимі тяги. З огляду на значний вплив мінливості поздовжнього профілю

на споживання енергії, у дослідженні подано метод синтезу типових профілів для цілей моделювання та оптимізації. Шляхом застосування алгоритму кластеризації за методом k -середніх до реальних даних про профілі перегонів у метрополітенах визначено три «типові» профілі, що відповідають легким, середнім і важким умовам руху. Кожен типовий профіль відображує основні статистичні показники (такі як максимальний ухил, середня довжина відрізка та загальна довжина перегону), узагальнено репрезентуючи різноманіття характеристик ухилів маршрутів міських рейкових систем.

Оптимізаційна модель, результати роботи якої використані в дослідженні, інтегрує в собі модель руху поїзда і стратегію керування ним, використовуючи принципи динамічного програмування для мінімізації енергоспоживання з дотриманням графіка руху.

За результатами дослідження пропонується використання коефіцієнта доданих енергетичних витрат для комплексного оцінювання енергетичної ефективності системи рейкового транспорту на певному перегоні.

Ключові слова: оптимізація траєкторії руху поїздів, міський залізничний транспорт, профілі перегонів, енергоефективність, динамічне програмування.

Abstract. The article is devoted to the issues of optimization of energy consumption in rail transport systems. This problem is complicated by uncertainty about the operating conditions and characteristics of electric rolling stock operating in a repeated-short-term traction mode. Given the significant impact of gradient and variability of it on energy consumption, the study presents a method for synthesizing generic gradients for modelling and optimization purposes. By applying the k -means clustering algorithm to real data on metro gradients, three ‘generic’ track gradients were derived, corresponding to light, medium and heavy operating conditions. Each generic gradient represents key statistical indicators (such as maximum gradient, average segment length, and total track section length), which summarizes the diversity of gradient characteristics of urban rail systems.

Building upon the established generic gradient profiles, the research develops a dynamic programming-based optimization model to determine the optimal train trajectory. The model simultaneously incorporates the train’s dynamic behavior and its control strategy. By discretizing the route into fixed-length segments, the model sequentially determines the optimal traction or braking force at each segment. This decision-making process is framed as a series of interconnected subproblems, with a cost function that balances energy expenditure and travel time. The optimization procedure utilizes a gradient descent method to iteratively adjust a Lagrange multiplier, ensuring that the final trajectory satisfies both the prescribed schedule and energy minimization objectives.

Based on the results of the study, it is proposed to use the added energy consumption coefficient (AECC) for a holistic assessment of the energy efficiency of a rail transport system on a particular section. This coefficient quantifies the additional energy required by the train when operating on real-world gradient profiles compared to a baseline profile with a constant gradient. By standardizing energy performance metrics across different track conditions, the AECC provides a robust tool for assessing and comparing the energy efficiency of various rolling stock configurations and operational strategies.

Keywords: train trajectory optimization, urban railway transport, track gradients, energy efficiency, dynamic programming.

Вступ. Питання оптимізації енергоспоживання на залізничному транспорті є важливим напрямом досліджень з огляду на його економічні та екологічні аспекти. У міських системах

рейкового транспорту різноманітність елементів поздовжнього профілю перегонів суттєво впливає на споживання енергії рухомим складом. Ця різноманітність створює експлуатаційні виклики, оскільки

прогнозування енергетичних і економічних показників рухомого складу, а також вибір його конструктивних характеристик під час циклу проектування стає складнішим завданням. Проблема оптимізації енергоспоживання додатково ускладнена повторно-короткочасним режимом роботи рухомого складу на коротких перегонах приміського та міського сполучення, де відстань між зупинками – 0,5...4 км. Цикл роботи тягових двигунів складається з фаз пуску зі швидким прискоренням, руху в режимі вибігу та інтенсивного гальмування.

Показник питомих витрат енергії рухомим складом на умовній рівній ділянці колії встановленої довжини не є досить інформативним для його потенційних операторів, оскільки не відображує його енергетичну ефективність у досить мінливих умовах середовища. Для покращення оцінювання енергетичної ефективності рухомого складу можна вважати доцільним розроблення узагальнених профілів колії, які б відображали різні умови експлуатації, що дало б змогу спростити питання оптимізації енергоспоживання в умовах невизначеності щодо умов експлуатації рухомого складу. Тому слід розглянути питання про методологію синтезу репрезентативних умовних профілів перегонів, зокрема за допомогою таких методів, як кластерний аналіз на основі реальних даних про перегони.

Визначивши окремі категорії профілів перегонів, наприклад легкі, середні та важкі умови руху, можна створити підґрунтя для подальшого покращення критеріїв оцінювання енергоефективності рухомого складу. З ускладненням профілю перегону, особливо з введенням ділянок з ухилами різної величини, істотного впливу на витрати енергії набуває правильність вибраної стратегії керування рухомим складом у разі руху за маршрутом із дотриманням заданих обмежень. Тому питання введення та врахування категорій профілів є нерозривно пов'язаним із питанням одночасної оптимізації на них

траєкторії руху поїздів із певними тяговими показниками.

Враховуючи зростаючий акцент на сталості залізничних систем, а також економічні труднощі транспортних підприємств – операторів рухомого складу – питання покращення енергоефективності рухомого складу на етапі проектування шляхом вибору оптимальних конструктивних характеристик є цілком актуальним. Впровадження узагальнених методик для кількісного та репрезентативного оцінювання витрат енергії поїздами може значно покращити оцінювання та порівняння енергетичних показників за різних умов експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі витрат електроенергії на рейковому транспорті, зокрема метрополітені, і їхній оптимізації присвячено багато різних публікацій. Основними напрямками зменшення витрат електроенергії є оптимізація траєкторії руху та/або оптимізація графіків [1-6], впровадження накопичувачів енергії (як стаціонарних, так і бортових) [7, 8] і застосування рекуперативного гальмування [9, 10]. Низка робіт зосереджена на ефективності поєднання цих підходів [11-14]. Водночас робіт, що були б присвячені кількісному дослідженню впливу окремих факторів (профіль, ступінь завантаження рухомого складу, середня швидкість і т. п.) на споживання електроенергії рухомим складом, недостатньо. Прикладом такої роботи можна назвати статтю [15].

Визначення мети та завдання дослідження. Основною метою статті є зниження ступеня невизначеності щодо оцінювання енергоефективності рухомого складу, спричиненої різноманітністю профілів перегонів і практик експлуатації поїздів. Дослідження проведено для випадку повторно-короткочасного режиму роботи рухомого складу, найбільш характерного для метрополітенів.

Для цього пропонувано розробити типові профілі перегонів, які б

відображували особливості різних типових категорій маршрутів. Як відповідний метод для досягнення цієї мети запропоновано кластерний аналіз, оскільки він може класифікувати і узагальнити різні показники перегонів в узгоджені категорії. Завдяки створенню цих репрезентативних профілів з'являється можливість оптимізувати енергоспоживання рухомого складу шляхом адаптації стратегій траєкторій до конкретних вимог кожного профілю.

Подальшою метою є використання цих оптимізованих траєкторій для створення узагальненого показника, який би кількісно оцінював енергоефективність рейкового транспорту як системи на різних ділянках шляху. Такий показник не лише забезпечить стандартизацію оцінювання енергоефективності, але й створить порівняльну базу для вдосконалення як рухомого складу, так і інфраструктури.

Виклад основної частини матеріалу.

Створення математичної моделі для оптимізації руху поїздів метрополітену за певним профілем перегону між двома станціями з подальшим прицільним гальмуванням потенційно відкриває значні можливості для економії коштів у контексті експлуатації поїздів метрополітену. Оптимізація траєкторії руху поїздів метрополітену є важливим фактором зниження енергоспоживання. Профіль шляху між двома станціями має значний вплив на витрати енергії, необхідні для руху поїзда. Моделюючи рух поїзда на певному профілі, можна визначити найбільш енергетично ефективну траєкторію з виконанням заданого графіка руху. Оптимізація траєкторії руху включає вибір середньої швидкості, прискорення та гальмування поїзда з метою мінімізації витраченої електроенергії.

1. Розроблення «типових профілів» методом кластеризації

Кластерний аналіз може бути застосований до набору даних реальних профілів маршрутів міського рейкового транспорту для виявлення груп подібних

профілів. Цей вид аналізу автономно поділяє дані на кластери на основі показника схожості, виявляючи в такий спосіб приховані закономірності та структури, які можуть бути не одразу помітними для людини-спостерігача. Загалом метою кластерного аналізу є поділ набору даних на окремі та значущі групи так, щоб об'єкти в межах однієї групи були більш схожими один на одного, ніж на об'єкти в інших групах.

Існує кілька алгоритмів кластерного аналізу, зокрема ієрархічна агломеративна кластеризація, кластеризація за методом k -середніх і просторова кластеризація додатків із шумом на основі щільності (*Density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN*). Ці алгоритми відрізняються підходом для визначення кластерів і критеріями, що використовують для віднесення об'єктів до кластерів.

Для виконання кластерного аналізу в рамках цього дослідження зібрані дані про профілі реальних перегонів (ділянок між зупинками) метрополітенів із відповідними довжинами характерних ділянок і їхні приведені ухили. Для кластерного аналізу кожний перегін у базі даних був репрезентований такими показниками:

- максимальним значенням ухилу i_{max} ;
- стандартним відхиленням розподілу значень ухилу для всього перегону σ_i ;
- середнім значенням ухилу для всього перегону $i_{сер}$;
- середньою довжиною сегмента профілю $L_{сер}$;
- повною довжиною перегону L .

Серед алгоритмів кластеризації кластеризація за методом k -середніх є оптимальним вибором для створення типових профілів із кількох причин. Однією з головних переваг кластеризації k -середніх є її простота і легкість реалізації. Алгоритм працює шляхом ітеративного віднесення точок даних до найближчого центроїда

кластера та оновлення центроїдів на основі середнього значення точок даних, віднесених до кожного кластера. Цей ітеративний процес зведено до локально оптимального рішення, що дає змогу легко реалізувати та інтерпретувати отримані кластери. Крім того, кластеризація за методом k -середніх не потребує жодних припущень про основний розподіл даних, що робить його придатним для широкого спектра наборів даних із різними характеристиками.

Крім того, кластеризація k -середніх за своєю суттю прийнятна для створення узагальнених профілів перегонів шляхом поділу набору даних на заздалегідь визначену кількість кластерів k . Спираючись на результати дослідницької роботи Галузевої науково-дослідної лабораторії моторвагонного рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту, цільова кількість кластерів для виконання алгоритму була визначена як три кластери. Центроїди, отримані за допомогою алгоритму k -середніх, можна інтерпретувати як репрезентативні або «загальні» профілі, що дають стислий опис характеристик кожного кластера. Така інтерпретованість полегшує подальше використання типових профілів у моделюванні оптимізації руху поїздів і дає змогу здійснювати змістовні порівняння та аналіз.

Розглянемо набір даних $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, де кожна точка даних x_i подана як вектор із p ознак або вимірів, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$. Метою кластерного аналізу є поділ X на k незв'язних кластерів так, щоб мінімізувати цільову функцію

$$J = \sum_k \sum_{x_i \in C_k} \text{dist}(x_i, \mu_k)^2, \quad (1)$$

де J – цільова функція, яку зазвичай називають «загальною сумою квадратів всередині кластера»;

μ_k – центроїд k -го кластера;

dist – функція відстані, для якої найчастіше використовують евклідовську та манхеттенську функції [16].

Результатом виконання алгоритму є отримання вихідних даних для побудови трьох умовних профілів, що являють собою типові умови перегонів на метрополітенах:

- І тип профілю – «легкий» – перегін загальною довжиною 1000 м з найбільшим ухилом 10 %;
- II тип профілю – «середній» – перегін загальною довжиною 1300 м з найбільшим ухилом 30 %;
- III тип профілю – «важкий» – перегін загальною довжиною 1700 м з найбільшим ухилом 40 %.

Будували умовний профіль на основі результатів кластерного аналізу за допомогою методу Монте-Карло шляхом випадкової генерації ділянок профілю і подальшого їх припасовування. При цьому параметри згенерованого профілю (максимальний ухил, середня довжина ділянки і т. д.) відповідають параметрам відповідного кластера. Детальна характеристика умовних профілів, створених на основі результатів кластеризації, наведена в табл. 1-3. З моделюванням руху потяга у зворотний бік значення ухилів змінюються на протилежні.

Таблиця 1

Умовний профіль типу I («легкий»)

Довжина ділянки, м	150	200	200	200	150	100
Ухил ділянки, %	3	10	-3	3	10	0

Таблиця 2

Умовний профіль типу II («середній»)

Довжина ділянки, м	150	50	150	50	100	250	400	50	100
Ухил ділянки, ‰	-5	30	30	3	3	3	-11	-17	0

Таблиця 3

Умовний профіль типу III («важкий»)

Довжина ділянки, м	150	50	200	200	50	100	50	300	400	50	50	100
Ухил ділянки, ‰	-5	-5	-35	-5	-3	-3	-3	40	30	30	5	0

Крім визначених методом кластеризації перегонів, у рамках цього дослідження для порівняння використано «нульовий» тип профілю – перегін із постійним ухилом 3 ‰ і довільною довжиною, що може дорівнювати довжині будь-якого з інших типових профілів.

2. Оптимізація траєкторії руху поїзда на перегоні

Модель, використана для оптимізації траєкторії руху, можна уявити як таку, що складається з двох структурних компонентів:

- модель динаміки рухомого складу (модель руху поїзда), що відображує вплив

на рух поїзда сигналу керування з урахуванням його навантаження, тягової характеристики та умов профілю;

- власне модель керування та оптимізації, відповідальну за вибір сигналу керування.

Оптимізацію траєкторії руху поїзда можна подати як послідовне завдання ухвалення рішень, де кожен крок передбачає визначення відповідного тягового або гальмівного зусилля, яке необхідно застосувати, враховуючи поточний стан поїзда (швидкість, опір рухові, прискорення) і бажаний результат (рис. 1).

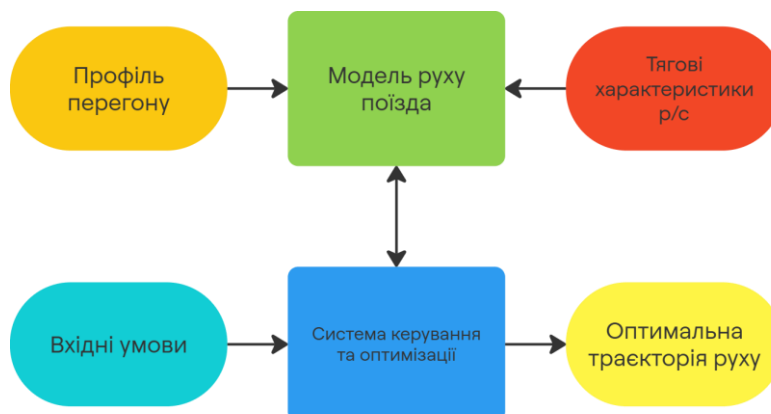


Рис. 1. Структурна діаграма моделі оптимізації траєкторії руху поїзда

Рух поїзда, а отже, і величина його прискорення або уповільнення залежать від сили тяги F , гальмівної сили B , величини сумарного опору рухові W , маси потяга P , коефіцієнта обертючих мас γ та описані основним рівнянням руху поїзда:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F-B-W}{P} \cdot \frac{g}{(1+\gamma)}, \quad (2)$$

де F – сила тяги, кН;

B – гальмівна сила, кН;

W – сумарний опір рухові, кН;

P – вага поїзда, кН;

g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²).

Система рівнянь, що описує роботу тягового привода поїзда на i -й ділянці з довільним значенням потужності тягового привода N' , кВт, і довільною кількістю моторних вагонів n має такий вигляд:

$$F_i = \begin{cases} \min [F_{max}, f'(V, N')] \cdot k_i \cdot n, & 0 < k \leq 1 \\ 0, & k = 0 \\ B_{max} \cdot k_i \cdot n, & -1 \leq k < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

де F_i – сила тяги поїзда на i -й ділянці перегону, кН;

F_{max} – максимальне значення сили тяги моторного вагона за умовою обмеження струму або зчеплення коліс із рейками, кН;

B_{max} – максимальне значення гальмівної сили моторного вагона за умовою обмеження струму або зчеплення коліс із рейками, кН, $B_{max} = -F_{max}$;

$f'(V, N')$ – тягова характеристика моторного вагона залежно від швидкості руху та потужності тягового привода;

V – швидкість руху, км/год;

k_i – «коефіцієнт тяги» на i -й ділянці.

Для отримання залежності $f'(V, N')$ може бути використана тягова

характеристика моторного вагона-прототипу, пропорційно змінена залежно від потужності тягового привода, що розглянута для оптимізації. Як прототип у рамках дослідження вибрано рухомий склад моделі 81-7036/7037 виробництва ПАТ «КВСЗ», обладнаний асинхронним тяговим приводом із потужністю тягових двигунів 4×180 кВт на вагон.

Ураховуючи, що за режиму реостатного гальмування витрат електроенергії з мережі нема, незважаючи на ненульове значення потужності, розвинутої тяговим приводом, витрати електроенергії на проходження будь-якої ділянки перегону A_i , кВт·год, для моделювання можна визначити так:

$$A_i = \begin{cases} \frac{\sum N_i \Delta t_i}{\eta \cdot 3600}, & F_i > 0 \\ 0, & F_i \leq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

де N_i – сумарна розвинута потужність тягового привода поїзда на i -й ділянці;

η – повний коефіцієнт корисної дії тягового привода ($\eta = 0,8 \dots 0,9$);

3600 – коефіцієнт переходу від секунд до годин.

Для побудови оптимальної траєкторії руху поїзда перегін поділено на ділянки фіксованої довжини (у рамках моделювання крок розбиття – 5 м). Отримані ділянки за необхідності також примусово розбивають у характерних точках (місцях зміни профілю).

Стратегія керування поїздом полягає в послідовності рішень про застосування тягового привода поїзда, де кожне наступне рішення залежить від результатів попередніх. Цей послідовний процес добре узгоджений із принципами динамічного програмування (ДП). Метод прямого проходу, загальний підхід у динамічному програмуванні, систематично здійснює перехід від початкового стану до кінцевого, гарантуючи, що кожен наступний крок оптимально спирається на попередні. Процес включає визначення функції вартості, яка є мінімальними кумулятивними витратами (або максимальними вигодами), від поточного стану до кінцевого.

Процес оптимізації за допомогою динамічного програмування за принципом прямого проходу можна сформулювати так:

1. Визначення змінної стану s_i на ділянці i , яка містить всю необхідну інформацію про стан поїзда.

2. Визначення змінної розв'язку k_i , яка відображує положення контролера машиніста (тобто задіяну силу тяги або гальмівну силу) на ділянці i .

3. Формулювання рекурсивного співвідношення, також відомого як рівняння Беллмана [17], яке виражає значення оптимальної політики в кожному стані через значення наступних станів. Математично це можна представити так:

$$V(s_i) = \min_{k_i} [V(s_{i-1}) + V(s_i, k_i)], \quad (5)$$

де $V(s_i)$ – функція вартості, що відображує мінімальну вартість проходження перегону за витратами енергії та часом;

$V(s_{i-1})$ – значення функції вартості на попередній ділянці за стану поїзда s_{i-1} ;

$V(s_i, k_i)$ – значення функції вартості на i -й ділянці за коефіцієнта тяги k_i .

Рухомий склад, що розглядають, має можливість плавно регулювати тягове зусилля в межах всієї тягової характеристики. За $-1 \leq k_i < 0$ виконується гальмування потяга; максимальне гальмове зусилля у всьому діапазоні швидкостей поїзда дорівнює від'ємній максимальній силі тяги за установлення струму або зчеплення F_{max} . За $k_i = 0$ тягове зусилля відсутнє, а поїзд рухається в режимі вибігу. За $0 < k_i \leq 1$ поїзд рухається в режимі тяги.

Проблему оптимізації траєкторії руху поїзда можна подати як проблему вибору оптимальної послідовності значень коефіцієнта тяги k з урахуванням змін у стані об'єкта, що оптимізується, тобто поїзда. Це в цілому відображує процес ухвалення рішень машиністом, що керує рухомим складом. Вибір певного значення k на кожній ділянці шляху є компромісом між витратами електричної енергії на рух поїзда і часом на проходження заданої ділянки та перегону в цілому. Для цього в процес вибору значення k на кожній ділянці шляху вводять функцію вартості, що відображує «ціну» кожного значення.

Функція вартості для оптимізації траєкторії руху поїзда метрополітену на перегоні має такий вигляд:

$$V(k) = \sum A_i(k_i) + \sum \lambda T_i(k_i) \rightarrow \min, \quad (6)$$

де A_i – витрати електроенергії поїздом на проходження i -ї ділянки перегону, кВт·год;

k_i – значення коефіцієнта k на i -й ділянці перегону;

λ – невизначений множник Лагранжа;

T_i – час проходження i -ї ділянки перегону, с.

Множник Лагранжа являє собою ваговий коефіцієнт, що визначає баланс між витратами енергії та часом проходження ділянки колії. Кожній комбінації характеристик рухомого складу, профілю та заданого часу проходження перегону відповідає своє значення λ .

Конкретної методики визначення множника Лагранжа не існує. У рамках цього дослідження для його визначення використано метод градієнтного спуску. На першому кроці розрахунку градієнтного спуску внесено незначне довільне збурення до величини λ . У подальшому пошук величини виконують за алгоритмом.

Для кожної i -ї ділянки перегону за заданим станом рухомого складу кожне j -те значення коефіцієнта тяги k_{ij} відповідає певному тяговому зусиллю $F_i(k_{ij})$, а отже, певній швидкості наприкінці ділянки $v_2^i(k_{ij})$, певному часу проходження цієї ділянки $T_i(k_{ij})$ і певним витратам

електричної енергії $A_i(k_{ij})$. Це дає змогу обчислити функцію вартості для кожної окремої ділянки $V_i(k_{ij})$. Остаточним (оптимальним) коефіцієнтом тяги на i -й ділянці вважають такий, який дає найменше значення функції вартості.

Після проходження по черзі всіх ділянок, на які був розбитий перегон, обраховують сумарний час його проходження $\sum T_i$ і порівнюють із заданим T_z . Ці дві величини використовують як вхідні в алгоритмі градієнтного спуску, який ітеративно змінює множник Лагранжа та перебудовує траєкторію руху, доки різниця між фактичним і заданим часом проходження ділянки не буде дорівнювати або буде меншою за критерій збіжності, після чого виконання алгоритму припиняється. Критерій збіжності визначає точність алгоритму градієнтного спуску та для моделювання приймали рівним 0,33 с.

Результатом роботи математичної моделі є побудова залежності витрат електричної енергії на певному типі перегону за певного часу руху. Оптимальні тахограми руху поїзда подані на рис. 2-5.

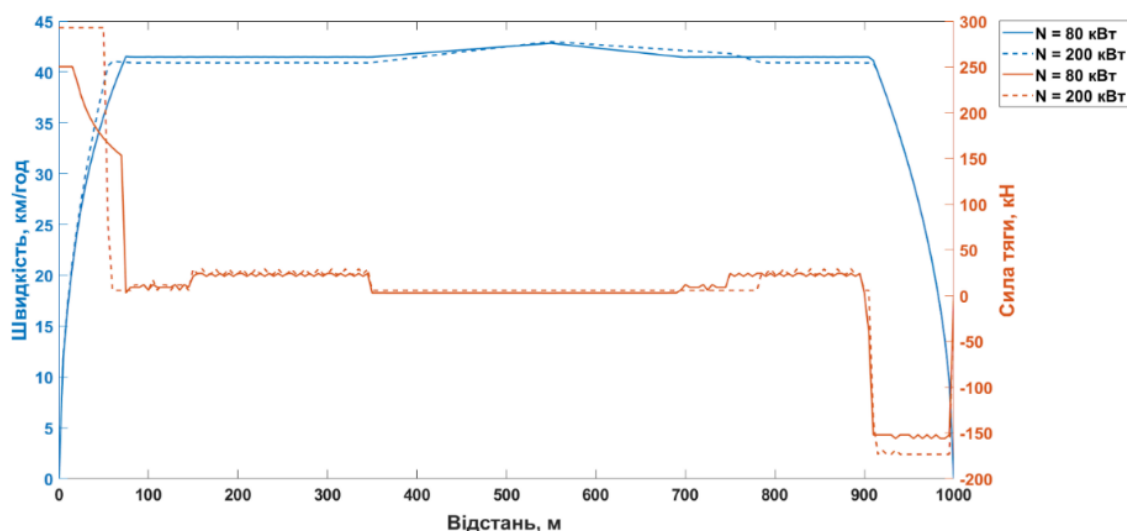


Рис. 2. Оптимальні тахограми руху поїзда з зазначенням швидкості руху (синій колір) і сили тяги (помаранчевий колір) на умовній ділянці I типу профілю для різної потужності тягових двигунів моторного вагона

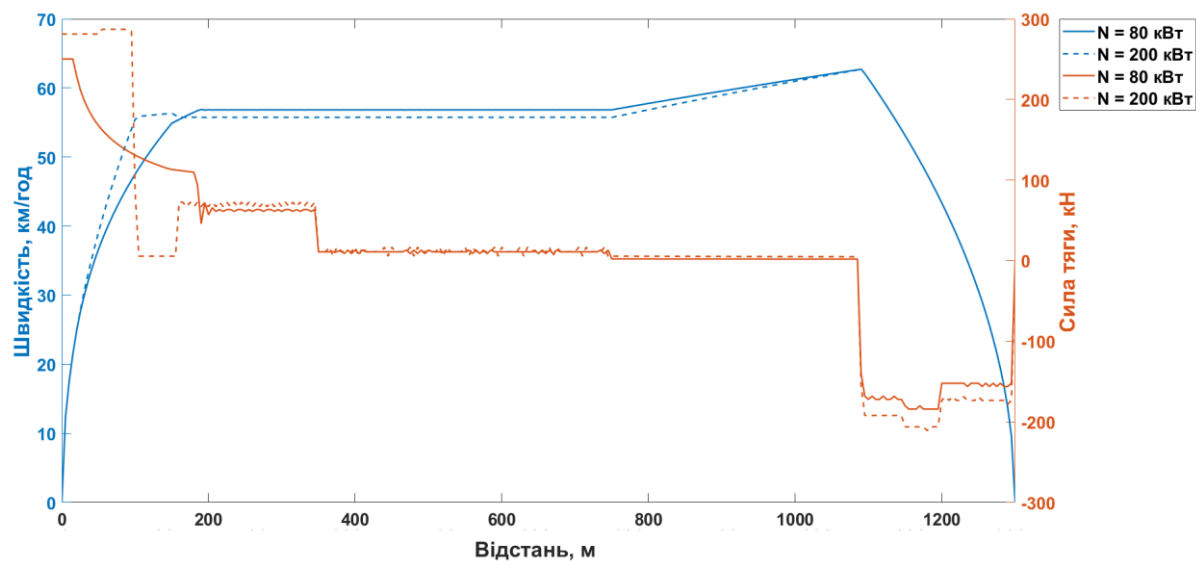


Рис. 3. Оптимальні тахограми руху поїзда з зазначенням швидкості руху (синій колір) і сили тяги (помаранчевий колір) на умовній ділянці II типу профілю

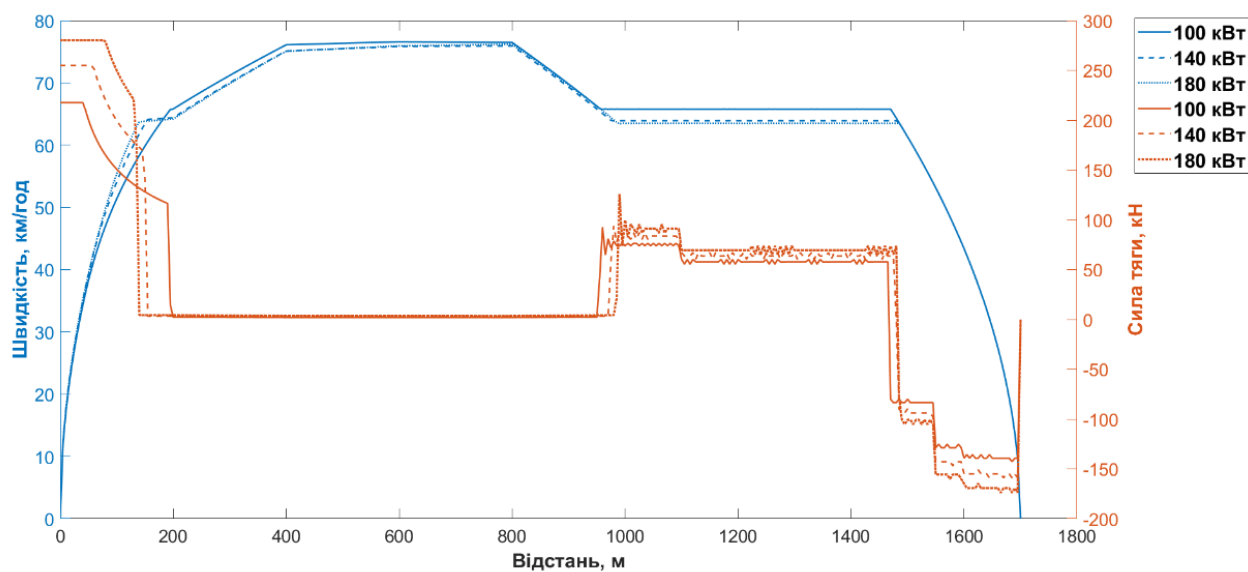


Рис. 4. Оптимальні тахограми руху поїзда з зазначенням швидкості руху (синій колір) і сили тяги (помаранчевий колір) на умовній ділянці III типу профілю

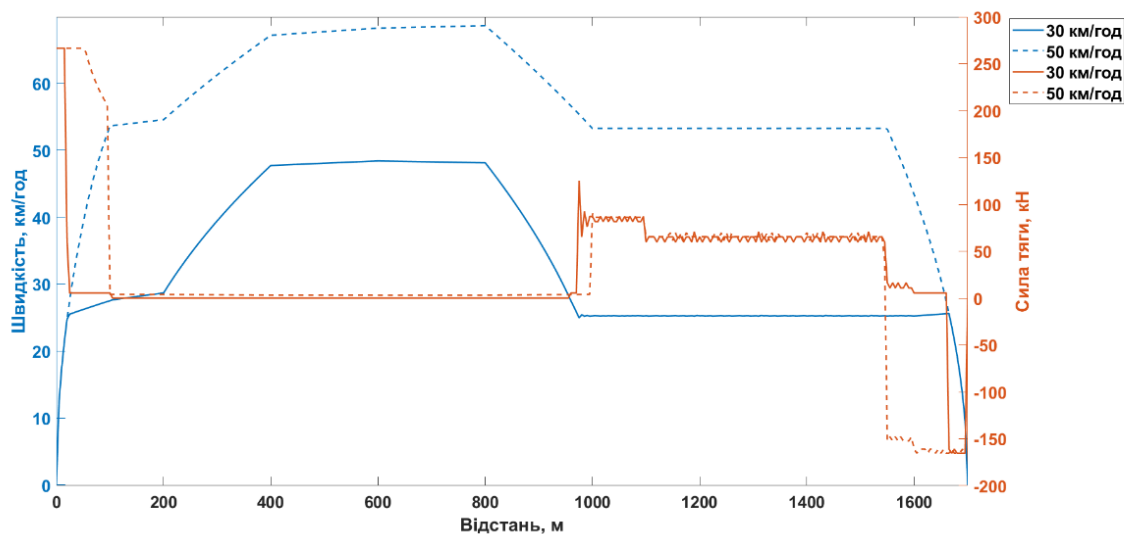


Рис. 5. Оптимальні тахограми руху поїзда на умовній ділянці III типу профілю залежно від заданої середньої швидкості руху по перегону

3. Визначення коефіцієнта доданих енергетичних витрат

Після виконання оптимізації траєкторії для заданого профілю підрахунок витрат енергії тяговим приводом поїзда на j -му профілі A_j , кВт·год, виконують так:

$$A_j = \sum_{i=1}^n A_i. \quad (7)$$

Оскільки в реальній експлуатації метрополітенів поїзди рухаються як у прямому, так і зворотному боці, оптимізацію для кожного типового профілю виконують двічі для обох напрямків руху. Результатом є отримання різного значення A_j : для прямого $A_{jп}$ і зворотного $A_{jз}$ напрямку.

Для узагальненої оцінки певної комбінації експлуатаційних умов щодо витрат електричної енергії можна ввести поняття коефіцієнта доданих енергетичних витрат (КДЕВ) K . Цей коефіцієнт являв би собою відношення витрат енергії тяговим приводом поїзда з подоланням певного профілю за заданий час (тобто із заданою середньою швидкістю) до витрат енергії з подоланням умовного профілю 0 типу

(постійний ухил 3 ‰) рівної довжини за той самий час:

$$K = \frac{A_j}{A_0}, \quad (8)$$

де A_0 – витрати електроенергії тяговим приводом поїзда на подолання умовного профілю 0 типу рівної довжини, кВт.

Слід зазначити, що в обох випадках витрати енергії A_j та A_0 є оптимізованими, тобто мінімальними для заданого часу руху по перегону. Розрахунок КДЕВ із такою умовою виключає вплив на витрати енергії суб'єктивних факторів, пов'язаних із можливим неоптимальним вибором стратегії керування машиністом. КДЕВ залежить лише від об'єктивних експлуатаційних умов, таких як характер профілю перегону, графікові обмеження, завантаженість і конструкційні показники рухомого складу. Коефіцієнт доданих енергетичних витрат служить узагальненою оцінкою наближення витрат енергії за таких умов до ідеалізованих, що спостерігали б на рівній ділянці профілю.

Результати підрахунків енергетичних витрат і КДЕВ для умовних профілів усіх типів (за припущення 50 % наповнення

вагонів пасажирами та потужності тягових двигунів 4×180 кВт на вагон) наведені в табл. 4-6 і на рис. 6.

Таблиця 4

Визначення КДЕВ для умовного профілю типу I («легкий»)

Середня швидкість, км/год	Витрати енергії на умовному профілі типу I, кВт			Витрати енергії на умовному профілі типу 0, кВт			Коефіцієнт доданих енергетичних витрат		
	Прямий напрямок	Зворотний напрямок	Сумарні	Прямий напрямок	Зворотний напрямок	Сумарні	Прямий напрямок	Зворотний напрямок	Сумарний
25	6,52	1,2	7,72	5,74	1,73	7,47	1,14	0,69	1,03
30	7,92	3,24	11,16	7,12	3,41	10,53	1,11	0,95	1,06
35	9,84	5,2	15,04	8,95	5,5	14,45	1,10	0,95	1,04
40	12,33	7,82	20,15	11,55	8,11	19,66	1,07	0,96	1,02
45	15,76	12,21	27,97	15,21	12,4	27,61	1,04	0,98	1,01
50	20,92	17,33	38,25	20,76	17,32	38,08	1,01	1,00	1,00

Таблиця 5

Визначення КДЕВ для умовного профілю типу II («середній»)

Середня швидкість, км/год	Витрати енергії на умовному профілі типу II, кВт			Витрати енергії на умовному профілі типу 0, кВт			Коефіцієнт доданих енергетичних витрат		
	Прямий напрямок	Зворотний напрямок	Сумарні	Прямий напрямок	Зворотний напрямок	Сумарні	Прямий напрямок	Зворотний напрямок	Сумарний
25	7,1	5,69	12,79	6,27	1,02	7,29	1,13	5,58	1,75
30	9,06	8,1	17,16	8,02	3,11	11,13	1,13	2,60	1,54
35	10,87	9,81	20,68	9,7	4,96	14,66	1,12	1,98	1,41
40	13,22	12,14	25,36	11,9	7,29	19,19	1,11	1,67	1,32
45	16,21	15,14	31,35	14,87	10,15	25,02	1,09	1,49	1,25
50	20,54	19,48	40,02	19,07	14,26	33,33	1,08	1,37	1,20

Таблиця 6

Визначення КДЕВ для умовного профілю типу III («важкий»)

Середня швидкість, км/год	Витрати енергії на умовному профілі типу II, кВт			Витрати енергії на умовному профілі типу 0, кВт			Коефіцієнт доданих енергетичних витрат		
	Прямий напрямок	Зворотний напрямок	Сумарні	Прямий напрямок	Зворотний напрямок	Сумарні	Прямий напрямок	Зворотний напрямок	Сумарні
25	16,76	0,23	16,99	8,24	1,71	9,95	2,03	0,13	1,71
30	17,76	0,23	17,99	9,3	2,71	12,01	1,91	0,08	1,50
35	19,16	0,45	19,61	10,9	4,43	15,33	1,76	0,10	1,28
40	20,93	0,97	21,9	12,86	6,82	19,68	1,63	0,14	1,11
45	22,74	2,07	24,81	15,38	9,14	24,52	1,48	0,23	1,01
50	25,27	3,91	29,18	18,59	12,15	30,74	1,36	0,32	0,95

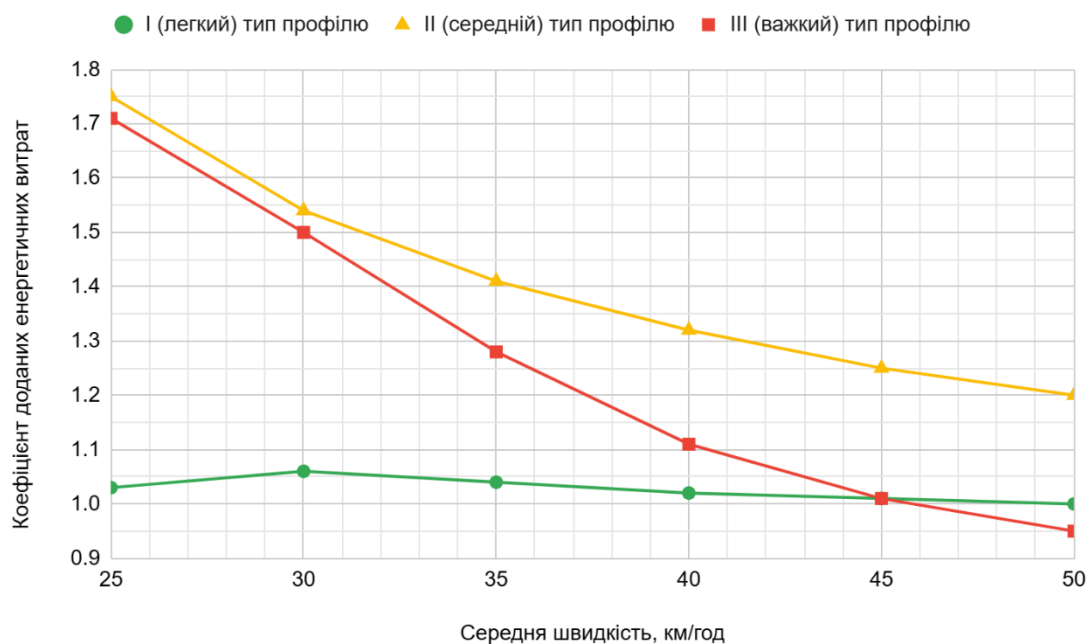


Рис. 6. Графічне подання залежності КДЕВ від середньої швидкості на типових профілях

Висновки. У рамках дослідження запропоновано підхід для зниження ступеня невизначеності щодо оцінювання енергоефективності рухомого складу, спричиненої різноманітністю профілів перегонів.

1. На основі даних про профілі реальних перегонів проведено кластерний аналіз, у результаті якого їх поділено на три характерні групи: з легким, середнім і складним профілем. За результатами кластерного аналізу створено умовні

репрезентативні профілі перегонів. Ці профілі відображують варіативність реальних умов експлуатації та забезпечують систематичну основу для оцінювання та порівняння енергоефективності рухомого складу.

2. Розроблено модель оптимізації траєкторії рухомого складу з довільною потужністю тягового привода та на довільному профілі перегону. Як алгоритм оптимізації модель використовує динамічне програмування за методом прямого проходу. Функція вартості кожного варіанта траєкторії визначена на основі балансу «енергія-час» за допомогою невизначеного множника Лагранжа, який уточнюють ітеративно за допомогою методу градієнтного спуску.

3. Як можливий комплексний критерій оцінювання енергетичної ефективності запропоновано коефіцієнт доданої енергетичної вартості (КДЕВ), який відображує наближення енерговитрат за реальних умов до ідеалізованого мінімального рівня за умови оптимальної траєкторії руху поїзда. КДЕВ розрахований для всіх типових профілів. Цей показник дає змогу стандартизовано порівнювати енергоефективність рухомого складу на певному профілі. Його впровадження забезпечує практичний інструмент для оцінювання та покращення енергетичних показників залізничних систем, підтримуючи більш обґрунтовані процеси ухвалення рішень.

Список використаних джерел

1. Ignacio Villalba Sanchis, Pablo Salvador Zuriaga. An Energy-efficient Metro Speed Profiles for Energy Savings: Application to the Valencia Metro. *Transportation Research Procedia*. 2016. Т. 18. С. 226-233. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.12.031.
2. Franke R., Meyer M., Terwiesch P. Optimal control of the driving of trains. *Automatisierungstechnik*. 2002. Т. 50. С. 606-613. DOI: 10.1524/auto.2002.50.12.606.
3. Khmelnitsky E. On an optimal control problem of train operation. *IEEE Trans. Autom. Control*. 2000. Т. 45. С. 1257-1266. DOI: 10.1109/9.867018.
4. Jacyna M., Gołębowski P. An approach to optimizing the train timetable on a railway network. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2015. № 146. С. 699-710. DOI: 10.2495/UT150571.
5. Caimi G., Kroon L., Liebchen Christian. Models for railway timetable optimization: Applicability and applications in practice. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2017. № 6. С. 285-312. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.11.002.
6. Gallo M., Botte M., Ruggiero A., D'Acierno L. A Simulation Approach for Optimising Energy-Efficient Driving Speed Profiles in Metro Lines. *Energies*. 2020. Т. 13, № 22. DOI: 10.3390/en13226038.
7. Barrero R., Tackoen X. & Mierlo J. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2010. Т. 224, № 3. С. 207-225. DOI: 10.1243/09544097JRRT322.
8. Electrical transport with onboard energy storage / Sergiy Yatsko, Yaroslav Vashchenko, Anatoliy Sidorenko, Borys Liubarskyi, Bagish Yeritsyan. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2019. Т. 9, № 2. С. 848-858. DOI: 10.20508/ijrer.v9i2.9143.g7652.
9. González-Gil A., Palacin R., Batty P. Sustainable urban rail systems: strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management*. 2013. № 75. С. 374-388. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.06.039.

10. Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains / M. Ceraolo, G. Lutzemberger, E. Meli, L. Pugi, A. Rindi, G. Pancari. *Journal of Energy Storage*. 2018. № 16. C. 269-279. DOI: 10.1016/j.est.2018.01.017.
11. A systems approach to reduce urban rail energy consumption / A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, J. P. Powell. *Energy Conversion and Management*. 2014. T. 80. C. 509-524. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.01.060.
12. Yatsko Serhiy, Vashchenko Yaroslav, Sidorenko Anatoliy. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2019. T. 9, № 1. C. 44-51. DOI: 10.23939/jcpee2019.01.044.
13. Energy Savings in Metropolitan Railway Substations Through Regenerative Energy Recovery and Optimal Design of ATO Speed Profiles / María Domínguez Gago, A. Fernández-Cardador, Asunción Paloma Cucala García, R. R. Pecharromán. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2012. T. 9. C. 496-504. DOI: 10.1109/TASE.2012.2201148.
14. Oettich S., Albrecht T. & Scholz S. Improvements of energy efficiency of urban rapid rail systems. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2004. T. 75. DOI: 10.2495/UT040561.
15. Neural networks for modelling the energy consumption of metro trains / M. Fernández, S. Zuriaga, V. Sanchis & I. Franco. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019. T. 234, № 7. C. 722-733. DOI: 10.1177/0954409719861595.
16. Everitt Brian S., Landau Sabine, Leese Morven, Stahl Daniel. *Cluster Analysis*. 5th Edition. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 330 c.
17. Bellman Richard E., Dreyfus Stuart E.. *Applied Dynamic Programming*. Princeton: Princeton University Press, 1962. 363 c.

Ляшенко Вадим Михайлович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.
E-mail: lyashenkovm99@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1139-3537>. Тел.: +38 (099)930-98-82.
Яцько Сергій Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.
E-mail: ua.yatsko@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>.

Liashenko Vadym, Postgraduate, Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.
E-mail: lyashenkovm99@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1139-3537>. Tel.: +38 (099)930-98-82.
Serhii Yatsko, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ua.yatsko@gmail.com.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>.

Статтю прийнято 19.03.2025 р.

УДК 621.3

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СТІЛОЧНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З ОБМЕЖЕННЯМ КІНЦЕВОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕВЕДЕННЯ СТІЛКИ

Кандидати техн. наук В. Ш. Хісмагулін, А. А. Прилипко, О. О. Сосунів,
старш. викл. М. В. Ушаков

THE SWITCH ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM WITH LIMITATION OF THE FINAL SPEED OF TRANSMISSION

PhD (Tech.) V. Khismatulin, PhD (Tech.) A. Prylypko, PhD (Tech.) A. Sosunov,
Sr. lecturer M. Ushakov

Анотація. У статті запропоновано синтез системи керування стрілочним електродвигуном із нульовою швидкістю наприкінці переведення, оптимальної за критерієм мінімуму квадратичного показника якості та комбінованим керуванням. Наведено математичні формулювання мети керування, критерію оптимальності і обмеження на керуючий вплив. Розроблено математичну модель привода з двигуном постійного струму. Проаналізовано керованість об'єкта з розв'язуванням варіаційної задачі. Синтез оптимальної системи керування виконано з використанням принципу максимуму Л. С. Понтрягіна.

Ключові слова: стрілочний електродвигун, гостряк, рамна рейка, квадратичний показник якості, принцип максимуму.

Abstract. The algorithm of operation of switch electric drives (the electric motor together with a reducer and a safety friction clutch) in railway transport is constructed in such a way that at the moment of completion of the working stroke of the tongue, its linear speed has the maximum value, and the braking process is provided only by the mechanical counteraction of the frame rail on the moving tongue. This process is accompanied by increased wear of the contacting parts, the deformation of the tongue, the rods and the elements of the hinged joints. To reduce the intensity of mechanical wear on the parts of the electric drive and the switch it is necessary to reduce the kinetic energy of the moving masses by reducing the velocity at the time the transfer is completed to zero or to a sufficiently small value. On the other hand, from the time of switching tongue depends the time of setting the routes, processing capacity of stations, sorting hills, that is, the efficiency of the transport complex as a whole. The aim of the article is to synthesize the control system of a switch electric motor with zero speed at the end of the translation, optimal by the quadratic quality index. The mathematical formulation of the goal of management, the criterion of optimality and the constraints on the control action are presented. A mathematical model of a drive with a DC motor is developed. The controllability of the object of the variational problem are analyzed. Synthesis of the optimal control system is performed using the maximum principle of L. S. Pontryagin. The analysis of the problem of practical implementation of the optimal control system is briefly analyzed.

Keywords: switch electric drive, tongue, frame rail, quadratic quality index, maximum principle.

Вступ. Алгоритм роботи стрілочного привода складається у виконанні декількох операцій. Після ввімкнення електродвигуна

його вал починає вільне обертання (холостий хід). Одночасно готується коло реверсування. Наступний етап – механічне

вимикання стрілки. Заключний етап – замикаання стрілки, отримання сигналу контролю крайнього положення і тільки після цього вимикання двигуна [1].

У момент завершення робочого ходу шибера його лінійна швидкість має максимальне значення, і процес гальмування інерційної системи супроводжується тільки силовим фактором [2]. Робота з поглинання кінетичної енергії наприкінці переведення стрілки зараз здійснюється лише за рахунок сил тертя в кінематичних парах гостряк – повзуни, пружних сил рамної рейки і гарнітури і лише частково поглинається фрикційною муфтою. На практиці це призводить до ударів гостряка об рамну рейку. Це послаблює кріплення деталей і вузлів електропривода і гарнітури, сприяє передчасному зносу механізмів і може призвести до виникнення нештатної ситуації [2].

На сьогодні найбільшу частку ринку України займають стрілочні електроприводи типу СП-6 [1] як базові для подальшого розгляду. Стрілочні електроприводи для високошвидкісних магістралей займають відносно малу частку ринку та мають деякі важливі особливості [3] і в цій роботі не розглянуті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [4] зазначено, що фактичний середній термін служби елементів стрілочних переводів для частини проєктів значно нижче за нормативний термін служби, який має бути забезпечений разом із технологією виробництва, належною експлуатацією і відповідною конструкцією переводу; вихід із ладу стрілочних переводів обумовлений здебільшого технологічними і експлуатаційними факторами. Однак близько 23 % несправностей обумовлено конструктивними факторами.

Одним із шляхів збільшення середнього терміну служби елементів стрілочного переводу і підвищення безпеки руху поїздів [5] є зменшення впливу

гостряка на рамну рейку наприкінці переведення стрілки. З цією метою слід гасити кінетичну енергію рухомих мас наприкінці переведення стрілки шляхом зменшення швидкості в момент завершення переведення до нуля або досить малої величини.

Вимога нульової швидкості в момент завершення переведення стрілки суперечить вимозі мінімальному часу переведення стрілки. Розв'язання цієї суперечності може бути досягнуто з використанням алгоритму керування, оптимального за швидкодією з нульовою швидкістю в момент закінчення керування.

У роботі [6] розглянуто такий підхід. На підставі принципу максимуму Л. С. Понтрягіна [7] синтезовано оптимальну за швидкодією систему керування та запропоновано функціональну структуру такої системи. Однак у цій роботі вказані головні проблеми практичної реалізації оптимальної системи [6]:

- необхідність точного розрахунку моменту перемикаання і його залежність від поточних параметрів привода. Помилка в розрахунку може призвести до недоведення шибера до кінцевої точки і невиконання операції замикаання стрілки;

- з реверсивним гальмуванням виникають значні комутаційні струми, що призводить до перевантажень елементів кола живлення;

- за наявності запізнення і неточності формування закону оптимального за швидкодією керування в системі може виникнути змінний режим автоколивань, що призводить до багаторазової комутації напруги живлення і затягування процесу переведення.

Тому оптимальну за швидкодією систему керування стрілочним електроприводом фактично можна використовувати тільки для оцінювання потенційно мінімального часу переведення стрілки з нульовою кінцевою швидкістю наприкінці переведення.

Це спонукає до пошуку інших варіантів реалізації схем керування стрілочним електроприводом із нульовою кінцевою швидкістю наприкінці переведення.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є синтез алгоритму керування стрілочним електродвигуном із нульовою швидкістю в момент завершення керування та порівняння його з оптимальним за швидкодією.

Вирішити завдання синтезу алгоритму керування стрілочним електродвигуном із нульовою кінцевою швидкістю наприкінці переведення пропонувано за допомогою теорії оптимального керування [7, 8].

Як відомо, для постановки завдання синтезу оптимального керування необхідно мати такі вихідні дані [7, 8]:

- 1) інформацію про об'єкт керування;
- 2) інформацію про зовнішні дії;
- 3) інформацію про мету керування;
- 4) інформацію про показник якості та критерії оптимальності керування;
- 5) інформацію про обмеження, накладені на величини вхідних впливів і координати стану об'єкта.

На основі зазначених вихідних даних необхідно знайти закон керування, який реалізує поставлену мету керування за накладених обмежень і забезпечить екстремальне значення заданого показника якості.

Основна частина досліджень. Як об'єкт керування розглянуто стрілочний електропривод типу СП-6 із двигуном постійного струму. З урахуванням того, що інерційність кола живлення якоря значно менше за інерційність рухомих механічних частин, динаміку роботи привода визначають за рівняннями [1]

$$\begin{aligned}\varphi'(t) &= k_p \cdot \Omega(t); \\ \Omega'(t) &= -\frac{1}{T} \Omega(t) + \frac{k_d}{T} u(t),\end{aligned}\quad (1)$$

де $\varphi(t)$ – кут повороту головного вала;
 k_p – коефіцієнт передачі редуктора;
 $\Omega(t)$ – кутова швидкість обертання якоря;
 T – електромеханічна стала двигуна;
 k_d – коефіцієнт підсилення двигуна за швидкістю;
 $u(t)$ – напруга живлення постійного струму.

Початкові і граничні умови для координат стану $\varphi(t)$ і $\Omega(t)$:

$$\begin{aligned}&\text{– початковий стан} \quad (t_0 = 0) \\ \varphi(0) &= 0, \quad \Omega(0) = 0; \\ &\text{– кінцевий стан} \quad (t = t_k) \\ J_2 \varphi(t_k) &= \varphi_k, \quad \Omega(t_k) = 0.\end{aligned}$$

Обмеження: напруга живлення $u(t)$ не має перевищувати припустимого значення U_m :

$$|u(t)| \leq U_m. \quad (2)$$

Розв'язання задачі синтезу для критерію мінімуму квадратичного показника якості. Розв'язують задачу за допомогою принципу максимуму.

Для зручності розв'язання доцільно перетворити змінні стану так, щоб отримати задачу з нульовим кінцевим станом. Для цього зробимо заміну змінних:

$$\begin{aligned}z_1(t) &= \varphi_k - \varphi(t); \\ z_2(t) &= -\varphi'(t) = -k_p \Omega(t).\end{aligned}\quad (3)$$

За такої заміни рівняння (1) набуває вигляду

$$\begin{aligned}z_1'(t) &= z_2(t); \\ z_2'(t) &= -\frac{1}{T} z_2(t) - \frac{K}{T} u(t),\end{aligned}\quad (4)$$

де $K = k_p \cdot k_d$ – загальний коефіцієнт підсилення (передачі) привода.

Початкові і граничні умови для координат стану $z_1(t)$ і $z_2(t)$:

$$z_1(0) = \varphi_k, \quad z_2(0) = 0, \quad z_1(t_k) = 0, \quad z_2(t_k) = 0. \quad (5)$$

Система (4) може бути переписана у векторно-матричній формі:

$$\vec{z}'(t) = \vec{A}\vec{z}(t) + \vec{B}u(t), \quad (6)$$

де $\vec{z}(t) = [z_1(t), z_2(t)]^T$ – вектор стану;

$$\vec{A} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{vmatrix} \text{ – матриця стану;} \quad (7)$$

$$\vec{B} = \begin{vmatrix} 0 \\ -\frac{K}{T} \end{vmatrix} \text{ – матриця входу.} \quad (8)$$

Квадратичний показник якості J_2 для цієї задачі має вигляд

$$J_2 = \int_0^{t_k} (q_1^2 \cdot z_1^2(t) + q_2^2 \cdot z_2^2(t) + u^2(t)) dt, \quad (9)$$

де q_1, q_2 – параметри функціонала, що задовольняють умову $q_1 \geq 0, q_2 \geq 0$;

$t_k = \infty$ – нефіксований момент закінчення керування.

Критерій оптимальності – мінімум квадратичного показника якості J_2 .

Для перевірки умови керованості визначимо матрицю керованості $\vec{M}$:

$$\vec{M} = [\vec{B} \quad \vec{A}\vec{B}]. \quad (10)$$

Матриця $\vec{M}$ є розширенням рядків матриці $\vec{B}$ шляхом послідовного дописування елементів відповідних рядків матриці $\vec{A}\vec{B}$.

Користуючись формулами (7), (8), одержуємо

$$\vec{M} = \begin{vmatrix} 0 & -\frac{K}{T} \\ -\frac{K}{T} & \frac{K}{T^2} \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Матриця $\vec{M}$ квадратна, її визначник

$$\det(\vec{M}) = -\frac{K^2}{T^2} \neq 0. \quad (12)$$

Отже, об'єкт керований, оскільки ранг матриці $\vec{M}$ дорівнює порядку об'єкта.

Відомо, що умова керованості об'єкта є достатньою умовою [7, 8] існування єдиного розв'язку варіаційної задачі для функціонала типу (9).

Розв'язання задачі за відсутності обмежень (2) на величину напруги живлення призводить до такого результату [7]:

$$u^*(t) = -k_1(t) \cdot z_1(t) - k_2(t) \cdot z_2(t), \quad (13)$$

де $k_1(t), k_2(t)$ – коефіцієнти, що залежать від вибору q_1, q_2 параметрів функціонала (9).

У загальному випадку величини коефіцієнтів є функціями часу, їх знаходять з урахуванням розв'язків матричного диференціального рівняння типу Ріккати для

заданих граничних умов [7, 8]. Алгоритм (13) структурно реалізовано у вигляді

лінійної системи зі зворотними зв'язками (рис. 1).

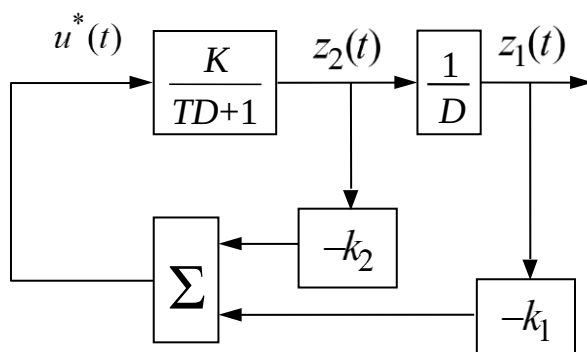


Рис. 1. Схема математичної моделі системи, оптимальної за квадратичним показником якості

У стаціонарному режимі передаточна функція замкненої системи зведена до стандартного вигляду ланки другого порядку з форсуванням:

$$W(p) = \frac{\tau \cdot p + 1}{T_0^2 \cdot p^2 + 2\xi T_0 \cdot p + 1}, \quad (14)$$

$$\text{де } 2\xi T_0 = \frac{k_2}{k_1} + \frac{1}{k_1 \cdot K}, \quad T_0 = \sqrt{\frac{T}{k_1 \cdot K}},$$

$$\tau = \frac{k_2}{k_1}.$$

Вибір параметрів k_1, k_2 може забезпечити задані показники якості перехідного процесу. Однак параметри еквівалентних ланок T_0, ξ, τ мають лише

два ступені свободи, тому їх не можна вибирати довільно.

У лінійній системі малого часу регулювання досягають за наявності невеликих коливань ($\xi = 0,5 \dots 0,8$), що є неприпустимим для стрілочних переводів. Крім того, ні величина керуючого впливу, ні час переведення за лінійного керування не обмежені. Наявність природних обмежень на керування (2) і нелінійностей, зумовлених силами опору, призводить до неможливості (!) практичної реалізації системи, оптимальної за квадратичним показником якості.

Синтез комбінованого керування. Для обмеження величини $u(t)$ і виключення зміни знака керуючого впливу введемо такий алгоритм (рис. 2):

$$u(t) = \begin{cases} U_m \cdot \text{sgn}(u^*(t)), & \text{при } |u^*(t)| \geq U_m, \\ u^*(t), & \text{при } U_m > |u^*(t)| > 0, \\ 0, & \text{після першої зміни знаку } u^*(t), \end{cases} \quad (15)$$

де $u^*(t)$ – керуюча напруга, визначена законом (13).

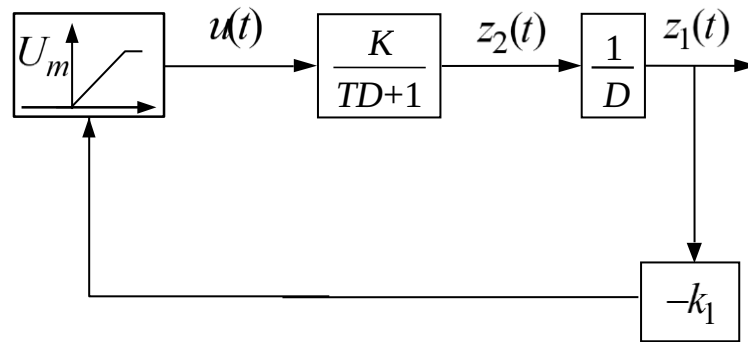


Рис. 2. Схема математичної моделі системи з комбінованим керуванням

На початковій ділянці переводу маємо керування, оптимальне за швидкодією, але на кінцевій – лінійний закон керування. Керування закінчується на момент t_k першої зміни знака $u^*(t)$ (момент першого узгодження).

Коефіцієнти кола зворотного зв'язку доцільно прийняти постійними. Оскільки коливання перехідного процесу виключені, з метою спрощення технічної реалізації доцільно прийняти $k_2 = 0$. У цьому випадку параметри еквівалентної ланки другого порядку дорівнюють

$$T_0 = \sqrt{T/(k_1 \cdot K)}, \quad \xi = 0,5/\sqrt{k_1 \cdot K \cdot T}, \quad \tau = 0. \quad (16)$$

Дослідження систем керування стрілочним приводом. Дослідження проводили на Simulink-моделі двигуна постійного струму МСП-0,15/160 стрілочного переводу СП-6. Модель містить такі основні компоненти (рис. 3):

- повну модель двигуна МСП-0,15/160 з урахуванням інерційності кола живлення якоря (електромагнітної постійної часу) і нелінійностей, зумовлених моментами сил сухого тертя та навантаження $|M_c|$ (субблок DPTN);
- субблок автоперемикача AP1;
- субблок Subsystem, у якому розраховують величини керуючої напруги залежно від закону керування (15), (16) з роботи [6] (оптимальна за швидкодією система) або законів керування (13), (15);
- віртуальні осцилографи Scope U/I, z.

Розрахунки проведені з навантаженням на валу, близьким до номінального ($M_c = 1,67 \text{ Н} \cdot \text{м}$). Початкові умови $z_1(t) = 280$ град, $z_2(t) = 0$.

Дослідження проведені для керування, оптимального за швидкодією (суцільні лінії), комбінованого керування (дрібний пунктир), а також штатного режиму (пунктир). На рис. 4-7 показані лише кінцеві ділянки від 2,5 до 4 с, оскільки на початковій ділянці керування здійснюється шляхом встановлення максимального значення напруги живлення, тому всі графіки мають однаковий вигляд, максимальний пусковий струм дорівнює 4,3 А.

За оптимального керування за швидкодією відбувається одноразова зміна знака напруги на кінцевій ділянці (реверс) за 0,12 с до моменту удару за штатного

керування. Зі зміною знака перепад струму становив 8,5 А. Тривалість реверсу становила 0,22 с, що призвело до збільшення часу переведення стрілки на 0,1 с.

За комбінованого керування напруга на кінцевій ділянці починає плавно зменшуватися приблизно за 0,6 с до моменту удару за штатного керування, а час керування збільшується на 0,35 с.

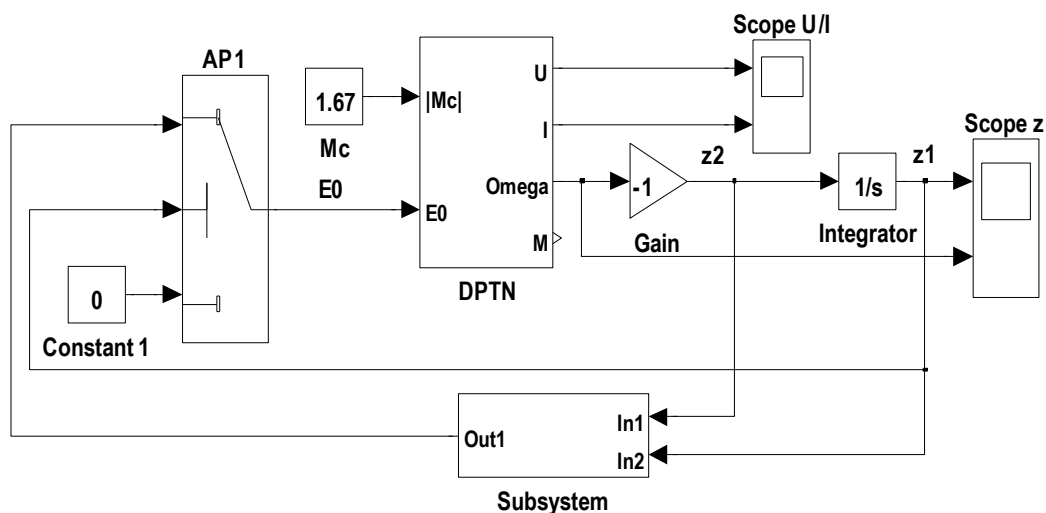


Рис. 3. Simulink-модель системи керування

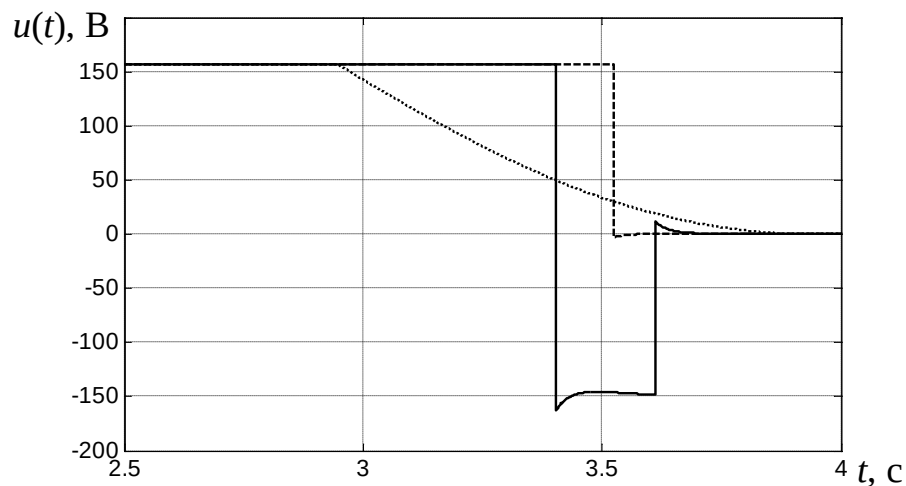


Рис. 4. Залежності напруги на якорі двигуна від часу за різних законів керування

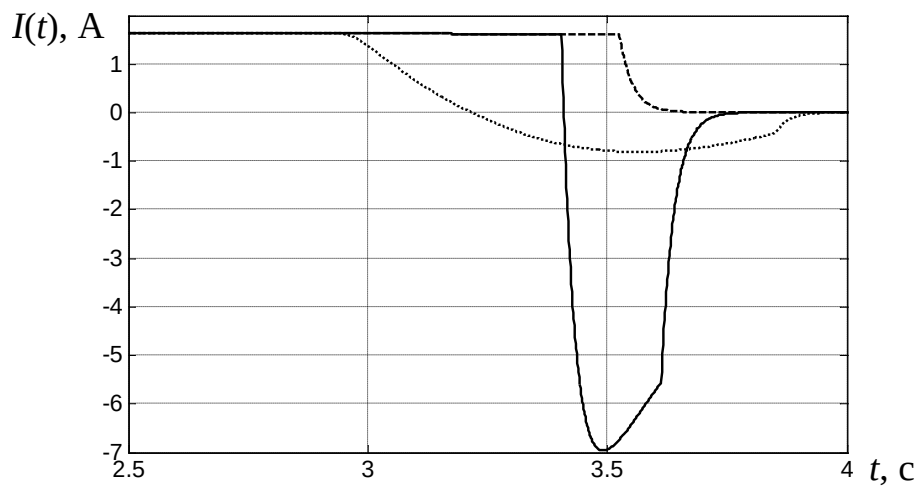


Рис. 5. Залежності струму якоря двигуна від часу за різних законів керування

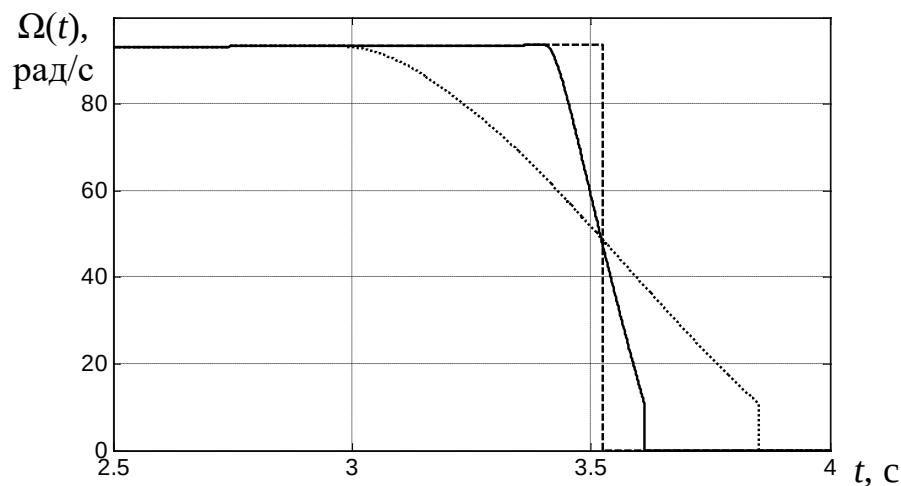


Рис. 6. Залежності кутової швидкості якоря двигуна від часу за різних законів керування

В обох випадках фактична швидкість обертання до зупинки вихідного вала в крайньому положенні знижується з 95 до 12,6 рад/с, а не до нуля. Це можна пояснити невідповідністю моделі (1), прийнятої для синтезу, і повної Simulink моделі двигуна, дослідженої в цій роботі. Досягти

швидкості, що дорівнює нулю, не вдається через наявність зони нечутливості, обумовленої силами сухого тертя. Втім, наявність невеликої залишкової швидкості є позитивним ефектом, що дає змогу забезпечити надійне замикання стрілки в крайньому положенні.

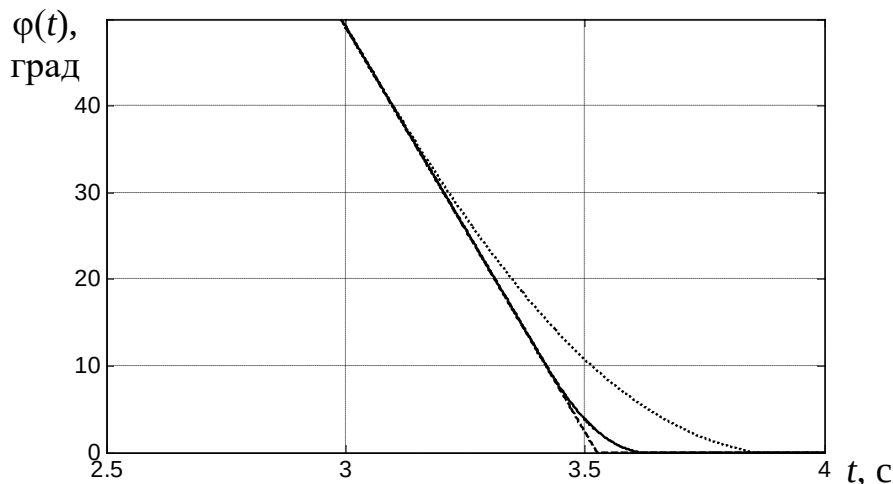


Рис. 7. Залежності кута повороту головного вала від часу за різних законів керування

Слід також зазначити, що за наявності запізнення і неточності формування закону оптимального за швидкістю керування виникає ковзний режим, що призводить до багаторазової комутації напруги живлення і затягування процесу переведення.

Встановлено також, що за комбінованого керування малі значення коефіцієнта k_1 ($\xi > 0,8$) призводять до передчасної зупинки обертання (недоведення шибера до положення замикання), що є неприпустимим. За великих – кінцева швидкість обертання може бути в межах 0,5...0,6 від номінальної, що небажано. Тому встановлення величини k_1 має бути виконано дуже ретельно.

Аналіз проблеми практичної реалізації системи керування. Функціональна структура системи керування стрілочним електроприводом має містити блок спостерігача стану та блок керування.

Блок спостерігача стану визначає кут повороту головного вала і кутову швидкість його обертання, перетворює їх у змінні Z_1, Z_2 . Вимірювання величин φ і φ' може бути виконано шляхом встановлення на

головний вал додаткових елементів – датчиків кута і кутової швидкості обертання. Замість датчика кута повороту можливе використання датчика лінійного положення шибера. У разі використання комбінованого керування достатньо лише датчика кута або положення.

Блок керування може бути реалізований на базі мікроконтролера з програмою обчислень відповідно до рівнянь (13), (15). За комбінованого керування до складу блока керування слід ввести регульований підсилювач для встановлення коефіцієнта k_1 .

Отже, існує важлива можливість практичної реалізації розглянутого комбінованого закону керування.

Висновки:

1. Для завершення робочого ходу шибера з нульовою кінцевою швидкістю запропоновано застосувати систему керування стрілочним переводом, оптимальну за квадратичним показником якості, і систему з комбінованим керуванням.

2. Система з комбінованим керуванням, на відміну від оптимальної системи, за квадратичним показником якості може бути практично реалізована.

3. Проведено порівняльний аналіз трьох систем керування: оптимальної за швидкістю, системи з комбінованим керуванням та штатної системи для стрілочного привода типу СП-6 із двигуном постійного струму МСП 0,15/160.

4. Система з комбінованим керуванням забезпечує невелику залишкову кутову швидкість обертання якоря двигуна

12,6 рад/с і збільшує час переведення на 0,35 с порівняно зі штатною системою, що не є принциповим (не для гіркових переводів!).

5. Запропоновано склад функціональної структури комбінованої системи керування – додаткові блоки спостерігача стану та керування на базі мікроконтролера з регульованим підсилювачем.

Список використаних джерел

1. Резников Ю. М. Электроприводы железнодорожной автоматики и телемеханики. Москва: Транспорт, 1985. 332 с.
2. Каменев А. И., Минков Е. Ю., Шуваев В. В., Савицкий А. Г. Анализ режима работы быстродействующих стрелочных приводов. *Автоматика, связь, информатика*. 2003. № 12. С. 2–5.
3. Омеляненко В. И., Буряковский С. Г., Любарский Б. Г. Электроприводы стрелочных переводов высокоскоростного электрического транспорта. *Українська залізниця*. 2017. № 9–10. С. 54–60.
4. Рибкін В. В., Баль О. М., Бондаренко І. О. Аналіз експлуатаційної стійкості елементів стрілочних переводів. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2011. № 38. С. 127–133.
5. Парфенов В. И., Разгонов В. П., Ковригин М. А. Анализ дефектов и возможности диагностики стрелочных переводов. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2007. № 15. С. 16–18.
6. Нейчев О. В., Сосунов О. О., Садовий К. В., Хісматулін В. Ш. Синтез оптимальної за швидкістю системи керування стрілочним електроприводом. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. Вип. 6(24). С. 20–26.
7. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. Москва: Наука, 1969. 384 с.
8. Boscain U., Piccoli B. Optimal synthesis for control systems on 2-D manifolds. Springer-Verlag, 2004. 262 p.

Хісматулін Володимир Шайдулович, кандидат технічних наук, професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7578-1217. Тел.: +38 (057) 730-10-32. E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Сосунов Олександр Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2175-7363. Тел.: +38(068) 607-88-13. E-mail: sosunov63@kart.edu.ua.

Прилипко Андрій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6126-1085. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkoa@kart.edu.ua.

Ушаков Михайло Віталійович, старший викладач кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6270-4212. Тел.: +38 (057) 730-10-32. E-mail: micush@kart.edu.ua.

Khismatulin Vladimir, PhD (Tech), professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7578-1217. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Sosunov Aleksandr, PhD (Tech). Associate professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2175-7363. Tel.: +38(068) 607-88-13. E-mail: sosunov63@kart.edu.ua.

Prylypko Andrii, PhD (Tech). Associate professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6126-1085. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkoaa@kart.edu.ua.

Ushakov Mykhailo, Senior Lecturer, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6270-4212. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: micush@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 24.03.2025 р.

УДК 629.42

МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ВПРОДОВЖ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, канд. техн. наук О. О. Шапатіна,
магістранти А. А. Васьковський, Д. О. Миколаєнко, М. В. Шпортак

SIMULATION OF RELIABILITY FOR THE TRACTION ROLLING STOCK DURING THE LIFE CYCLE

D.Sc. (Tech.) O. Krashenin, PhD (Tech.) O. Shapatina, master students A. Vaskovkyi,
D. Mykolaenko, M. Shportak

***Анотація.** Забезпеченню процесу ефективного функціонування тягового рухомого складу (ТРС) завжди приділяли велику увагу, що пов'язано зі значними витратами на його створення і експлуатацію. Вирішальним у забезпеченні цих умов є комплексне врахування всіх факторів, що впливають на його ефективну роботу. З урахуванням цього в статті розглянуто питання, пов'язані з забезпеченням надійності ТРС протягом всіх стадій життєвого циклу (ЖЦ). А це передбачає оцінювання впливу факторів на забезпечення надійної роботи ТРС з урахуванням стадії ЖЦ, їхньої кількості й ціни зусиль, що забезпечують високий рівень надійності.*

***Ключові слова:** дефект, життєвий цикл, надійність, тяговий рухомий склад, стадії життєвого циклу.*

***Abstract.** Great attention is always paid to ensuring the process of effective functioning of traction rolling stock, which is associated with significant costs for its creation and operation. A decisive factor in ensuring these conditions is a comprehensive consideration of all factors affecting its reliable operation. The paper deals with issues related to ensuring the reliability of traction rolling stock at all stages of the life cycle. This involves assessing the impact of factors on ensuring the mentioned reliability, taking into account the stage of the life cycle, their number, and the cost of efforts that ensure a high level of reliability. The expediency of using statistical models for a more detailed study of specific multistage programs is noted. When creating expensive unique complex systems, such as traction rolling stock, the greatest effect in saving material, cost, and time resources, under other equal conditions, will be achieved by breaking down the complex process of creating and*

operating the system into a larger number of controlled stages, gradually implementing monitoring of the technical condition of traction rolling stock equipment. It is established that with the introduction of each controlled stage into the process, additional time is required for information gathering, analysis of the results obtained, and the development of control actions, as well as additional costs of material, technical, and financial resources. It is investigated that dividing the process into more than twelve stages can only be justified for extremely complex unique systems, the failure of which is completely unacceptable. When creating simple systems for which there is extensive experience in similar developments, it is advisable to reduce the number of controlled stages without compromising reliability. A methodology is proposed that can be used to assess the reliability of any locomotive system with a discrete functioning structure.

Keywords: defect, life cycle, reliability, stages of the life cycle, traction rolling stock.

Вступ. Світова промисловість останніми роками виготовила велику кількість серій ТРС різного призначення, орієнтуючись на потреби замовника. Частина цієї продукції надійшла в Україну з-за кордону і вже декілька років експлуатована на залізницях.

На жаль, експлуатація цього рухомого складу не завжди відповідала очікуванням щодо його надійності. На це вплинуло багато факторів місцевого характеру, таких як непристосованість ремонтної інфраструктури, високі експлуатаційні навантаження, відсутність досвіду з їх експлуатації та забезпечення повноцінного рівня організації ТО, ПР.

З іншого боку, не були враховані фактори забезпечення надійності з проєктуванням, для рівня підготовки до експлуатації цього ТРС у реаліях України; проведення необхідних випробувань на полігоні залізниць України; особливостей експлуатації на колії 1520 мм тощо.

Усе це актуалізує пошук шляхів і заходів із забезпечення надійної роботи ТРС за весь життєвий цикл.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Велика кількість публікацій про забезпечення ефективної роботи ТРС орієнтована на оптимізацію системи ремонту, а саме оптимізацію міжремонтних пробігів і їхню циклічність [1, 2, 4, 5]. Цей період пов'язаний зі стабільною і налагодженою системою виробництва вітчизняного ТРС.

Однак через деякий час значну увагу почали приділяти питанням модернізації ТРС в різних об'ємах [2, 7], що було пов'язано з повільним процесом удосконалення ТРС для їх виготовлення.

Окремі публікації присвячені питанням урахування витрат на утримання ТРС за життєвий цикл [2, 3, 8], що пов'язано зі значними експлуатаційними витратами, які перевищували первинну ціну ТРС у 20-25 разів.

Тому все більше уваги стали приділяти питанням удосконалення організації ТО, ПР ТРС, заохочуючи до цього процесу виробників і спеціалізовані сервіси, які брали на себе відповідальність за ефективну експлуатацію ТРС [1, 6].

Слід зазначити, що весь спектр окремих завдань розглядали окремо один від одного, що не могло не вплинути на ефективність реалізації цих заходів.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета статті полягає в розробленні процедури моделювання надійності ТРС з урахуванням усіх стадій життєвого циклу на основі відповідних факторів.

Відповідно до цього вирішено такі завдання:

1. Формування моделі надійності роботи ТРС на всіх стадіях життєвого циклу.
2. Оцінювання рівня надійності залежно від кількості стадій життєвого циклу.
3. Оцінювання рівня витрат, що забезпечують високий рівень надійності за стадіями життєвого циклу.

Основна частина дослідження.

Життєвий цикл будь-якої системи, зокрема ТРС, охоплює низку стадій і етапів проєктування, випробувань, виготовлення та експлуатації.

Рівень надійності системи загалом залежить від рівнів надійності, яких досягають на кожній стадії життєвого циклу системи:

$$R = R(P_{np}, P_{випр}, P_{виг}, P_{ек}), \quad (1)$$

де P_{np} — надійність системи, досягнута в результаті проєктування,

$$P_{np} = [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np}, \quad (2)$$

де P_0 — надійність номінального (вихідного) варіанта системи без будь-якого резерву або інших форм надмірності;

a_{np} — коефіцієнт, що виражає ефективність введення надмірності та інших додаткових проєктних рішень, спрямованих на забезпечення надійності;

b_{np} — коефіцієнт, що виражає якість (бездефектність) проєктно-конструкторської документації;

$P_{випр}$ — надійність системи, досягнута в процесі експериментальних робіт і випробувань,

$$P_{випр} = [P_{np} + (1 - P_{np}) \cdot a_{випр}] \cdot b_{випр}, \quad (3)$$

де $a_{випр}$ — коефіцієнт, що виражає ефективність виявлення й усунення дефектів у конструкторській документації (конструкторських помилок);

$b_{випр}$ — коефіцієнт, що виражає якість (бездефектність) випробувань і коректування робочої документації на виготовлення виробів;

$P_{виг}$ — надійність системи, забезпечена з виготовленням,

$$P_{виг} = [P_{випр} + (1 - P_{випр}) \cdot a_{виг}] \cdot b_{виг}, \quad (4)$$

де $P_{випр}$ — надійність системи після завершення експериментальних досліджень і випробувань;

$a_{виг}$ — коефіцієнт, що виражає ефективність заходів, спрямованих на забезпечення якості й надійності виробів системи в процесі виробництва, зокрема ефективність заходів із виявлення й усунення дефектів у технічній і нормативній документації на серійне виготовлення;

$b_{виг}$ — коефіцієнт, що виражає якість (бездефектність) виготовлення виробів;

$P_{ек}$ — надійність системи, введена в експлуатацію,

$$P_{ек} = [P_{виг} + (1 - P_{виг}) \cdot a_{ек}] \cdot b_{ек}, \quad (5)$$

де $P_{виг}$ — надійність системи, забезпечена з виготовленням;

$a_{ек}$ — коефіцієнт, що виражає ефективність виявлення й усунення дефектів експлуатаційно-технічної документації і локалізації наслідків відмови системи на початку експлуатації;

$b_{ек}$ — коефіцієнт, що виражає якість (бездефектність) роботи персоналу.

Використовуючи формули (2) — (5), одержимо рекурентні вирази для досягнутого рівня надійності системи після кожної стадії робіт

$$P_{np} = [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np} = [\cdot] \cdot b_{np};$$

$$\begin{aligned} P_{випр} &= \{[\cdot] \cdot b_{np} + (1 - [\cdot] \cdot b_{np}) \cdot a_{випр}\} \cdot b_{випр} = \\ &= \{[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np} + (1 - [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np}) \cdot a_{випр}\} \cdot b_{випр} = \{\cdot\} \cdot b_{випр}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{виз} &= [\{\cdot\} \cdot b_{випр} + (1 - \{\cdot\} \cdot b_{випр}) \cdot a_{виз}] \cdot b_{виз} = \\
&= [\{[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np} + (1 - [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np}) \cdot a_{випр}\} \cdot b_{випр} + \\
&+ (1 - \{[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np} + (1 - [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np}) \cdot a_{випр}\} \cdot b_{випр}) \cdot a_{виз}] \cdot b_{виз} = \\
&= [\bullet] \cdot b_{виз};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{эк} &= \langle [\bullet] \cdot b_{виз} + (1 - [\bullet] \cdot b_{виз}) \cdot a_{ек} \rangle \cdot b_{ек} = \\
&= \langle \{[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np} + (1 - [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np}) \cdot a_{випр}\} \cdot b_{випр} + \\
&+ (1 - \{[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np} + (1 - [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np}) \cdot a_{випр}\} \cdot b_{випр}) \cdot a_{виз}] \cdot b_{виз} + \\
&+ (1 - \{[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np} + (1 - [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np}) \cdot a_{випр}\} \cdot b_{випр} + \\
&\quad + (1 - \{[P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np} + \\
&\quad + (1 - [P_0 + (1 - P_0) \cdot a_{np}] \cdot b_{np}) \cdot a_{випр}\} \cdot b_{випр}) \cdot a_{виз}] \cdot b_{виз} \rangle \cdot b_{ек}.
\end{aligned}$$

Як випливає з цих виразів, надійність, досягнута на i -й стадії робіт, залежить від номінального (вихідного) рівня надійності P_0 і коефіцієнтів a_i , b_i .

Коефіцієнти a_i характеризують ефективність заходів, оцінюваних математичним апаратом теорії імовірностей і математичної статистики. Коефіцієнти b_i характеризують втрати надійності системи внаслідок різних помилок, допущених з

проектуванням, випробуванням, оформленням документів, у виробництві та експлуатації, тобто відображують слабко формалізовану, неточно прогнозовану й неоперативно контрольовану статистично нестійку частину надійності виробу.

Розглянемо вплив факторів P_0 , a_i , b_i на рівень загальної надійності, приймаючи $P_0 = 0,5$, а всі a_i , b_i на рівні 0,9.

Тоді

$$P_{np}(P_0 = 0,5; a = 0,9; b = 0,9) = [0,5 - (1 - 0,5) \cdot 0,9] \cdot 0,9 = 0,855.$$

$$P_{випр} = [0,855 - (1 - 0,855) \cdot 0,9] \cdot 0,9 = 0,886.$$

$$P_{виз} = [0,886 - (1 - 0,886) \cdot 0,9] \cdot 0,9 = 0,889.$$

$$P_{ек} = [0,889 - (1 - 0,889) \cdot 0,9] \cdot 0,9 = 0,89.$$

Приймаючи $P_0 = 0,5$, а всі $a_i = 0,5$, $b_i = 0,9$, отримуємо

$$P_{np}(P_0 = 0,5; a = 0,5; b = 0,9) = [0,5 - (1 - 0,5) \cdot 0,5] \cdot 0,9 = 0,675.$$

$$P_{випр} = [0,675 - (1 - 0,675) \cdot 0,5] \cdot 0,9 = 0,754.$$

$$P_{виз} = [0,754 - (1 - 0,754) \cdot 0,5] \cdot 0,9 = 0,789.$$

$$P_{ек} = [0,789 - (1 - 0,789) \cdot 0,5] \cdot 0,9 = 0,805.$$

На підставі цих розрахунків на рис. 1 зображено вплив різних рівнів факторів P_0 , α_i і β_i на надійність системи за стадіями життєвого циклу.

З рис. 1 випливає:

— зростання надійності ТРС можна досягнути на різних стадіях розроблення його як системи, але найвищу — з проєктуванням. Однак досягнуту надійність можна втратити на будь-якій наступній стадії життєвого циклу цієї системи;

— найважливішу роль відіграє вибір вихідного варіанта ТРС, що забезпечує рівень P_0 (причому використання нових, неапробованих рішень може як знизити, так і підвищити P_0);

— реалізація ефективних заходів із забезпечення надійності (підвищення α_i) дає

змогу знизити втрати і досягти необхідної високої надійності ТРС;

— неприпустимо зневажати «бездефектною» складовою надійності, особливо коли йдеться про унікальні системи, яким є сучасний ТРС, оскільки помилки й дефекти можуть перекреслити найкращу розробку (яскравим прикладом був тепловоз 2ТЕ121);

— необхідно враховувати витрати ресурсів для підвищення надійності, реалізовані на різних стадіях використання ТРС, уміти раціонально розподіляти ресурси, що виділяють за стадіями робіт;

— збільшення кількості контрольованих стадій і етапів в обґрунтованих межах дає змогу зменшити втрати через недостатню надійність окремого обладнання ТРС.

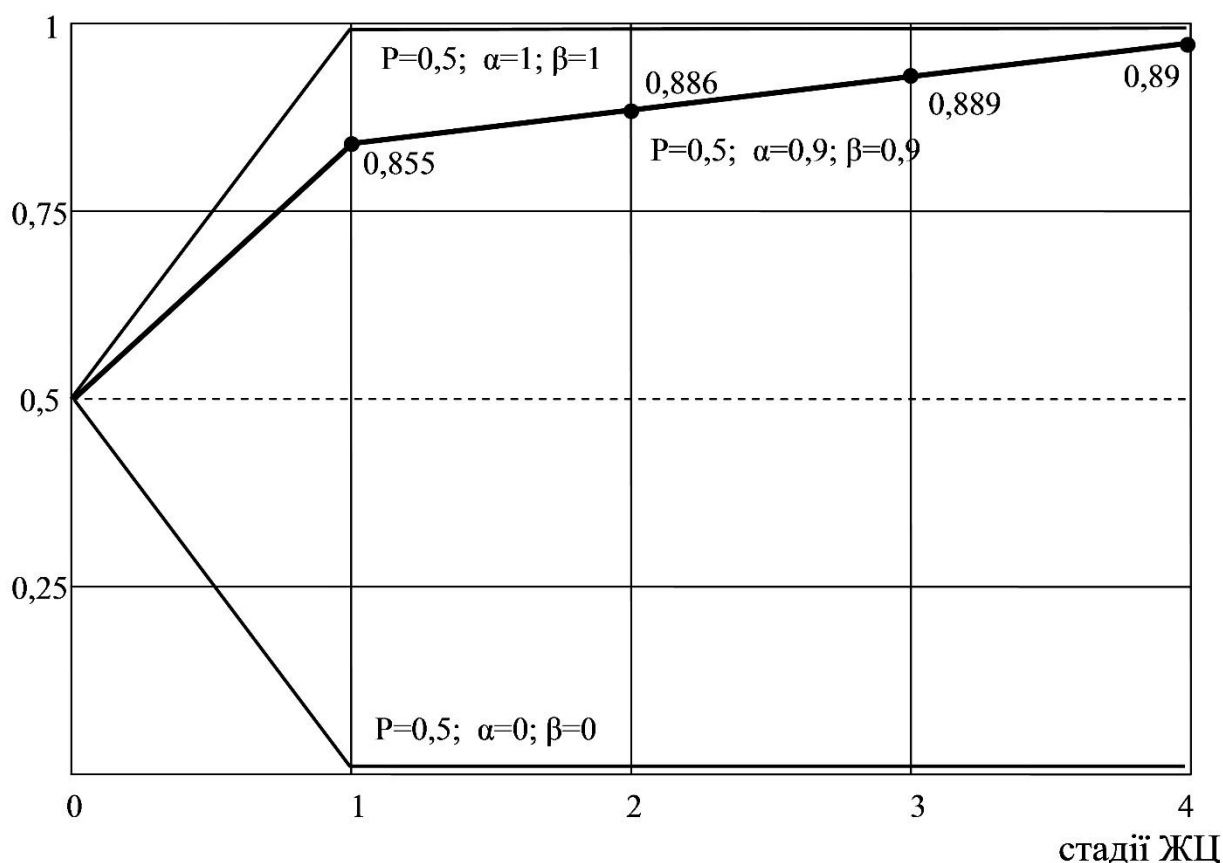


Рис. 1. Динаміка зміни надійності за стадіями ЖЦ:
1 — проєктування; 2 — випробування; 3 — виготовлення;
4 — експлуатація; $P_0 = 0,5$

Розглянемо на прикладі зв'язок рівня надійності P і втрат Q відносно кількості контрольованих стадій ЖЦ, відповідно додаючи декілька додаткових стадій до основних.

Для першої стадії проектування (у формулах позначено нижнім індексом від 1 до 4 додану кількість стадій ЖЦ і верхнім індексом у формулах (3) — (12) — кількість стадій).

$$P_1^{(3)} = [0,5 + (1 - 0,5) - 0,9] = 0,675; Q_1^{(3)} = 1 - 0,675 = 0,325;$$

$$P_2^{(3)} = [0,675 + (1 - 0,675) - 0,9] = 0,754; Q_2^{(3)} = 1 - 0,754 = 0,246;$$

$$P_3^{(3)} = [0,754 + (1 - 0,754) - 0,9] = 0,789; Q_3^{(3)} = 1 - 0,789 = 0,211;$$

$$P_4^{(3)} = [0,789 + (1 - 0,789) - 0,9] = 0,805; Q_4^{(3)} = 1 - 0,805 = 0,195.$$

Аналогічно для другої стадії випробування

$$P_1^{(6)} = [0,805 + (1 - 0,805) - 0,9] = 0,812; Q_1^{(6)} = 1 - 0,812 = 0,188;$$

$$P_2^{(6)} = [0,812 + (1 - 0,812) - 0,9] = 0,815; Q_2^{(6)} = 1 - 0,815 = 0,185;$$

$$P_3^{(6)} = [0,815 + (1 - 0,815) - 0,9] = 0,816; Q_3^{(6)} = 1 - 0,816 = 0,184;$$

$$P_4^{(6)} = [0,816 + (1 - 0,816) - 0,9] = 0,817; Q_4^{(6)} = 1 - 0,817 = 0,183.$$

Для третьої стадії виготовлення

$$P_1^{(9)} = [0,818 + (1 - 0,818) - 0,9] = 0,8181;$$

$$Q_1^{(9)} = 1 - 0,8181 = 0,1819;$$

$$P_2^{(9)} = [0,8181 + (1 - 0,8181) - 0,9] = 0,81818;$$

$$Q_2^{(9)} = 1 - 0,81818 = 0,18182;$$

$$P_3^{(9)} = [0,8182 + (1 - 0,8182) - 0,9] = 0,81819;$$

$$Q_3^{(9)} = 1 - 0,81819 = 0,18181;$$

$$P_4^{(9)} = [0,81819 + (1 - 0,81819) - 0,9] = 0,8182;$$

$$Q_4^{(9)} = 1 - 0,8182 = 0,1818.$$

На четвертій стадії експлуатації зміна $P_1^{(12)}$ і відповідне значення $Q^{(12)}$ змінюються досить повільно відносно попереднього ступеня ЖЦ.

Різниця $\Delta Q_i = Q_i^{(1)} - Q_i^{(2)}$ з переходом від чотири- до дванадцятиступеневого

процесу створення та експлуатації системи дорівнює

$$\Delta Q_1 = 0,325 - 0,195 = 0,13;$$

$$\Delta Q_2 = 0,246 - 0,183 = 0,063;$$

$$\Delta Q_3 = 0,211 - 0,1818 = 0,3;$$

$$\Delta Q_4 = 0,195 - 0,18 = 0,015.$$

На рис. 2 показано відносні втрати надійності залежно від кількості контрольованих стадій за фіксованих значень $P_0 = 0,5$, $a_i = 0$, $b_i = 0,9$. Ламана лінія 1

відповідає чотирьом контрольованим стадіям, ламана лінія 2 — дванадцяти. Ламана лінія 3 показує різницю $\Delta Q_i = Q_i^{(1)} - Q_i^{(2)}$, одержану з переходом від чотири- до дванадцятишарового процесу створення та експлуатації системи.

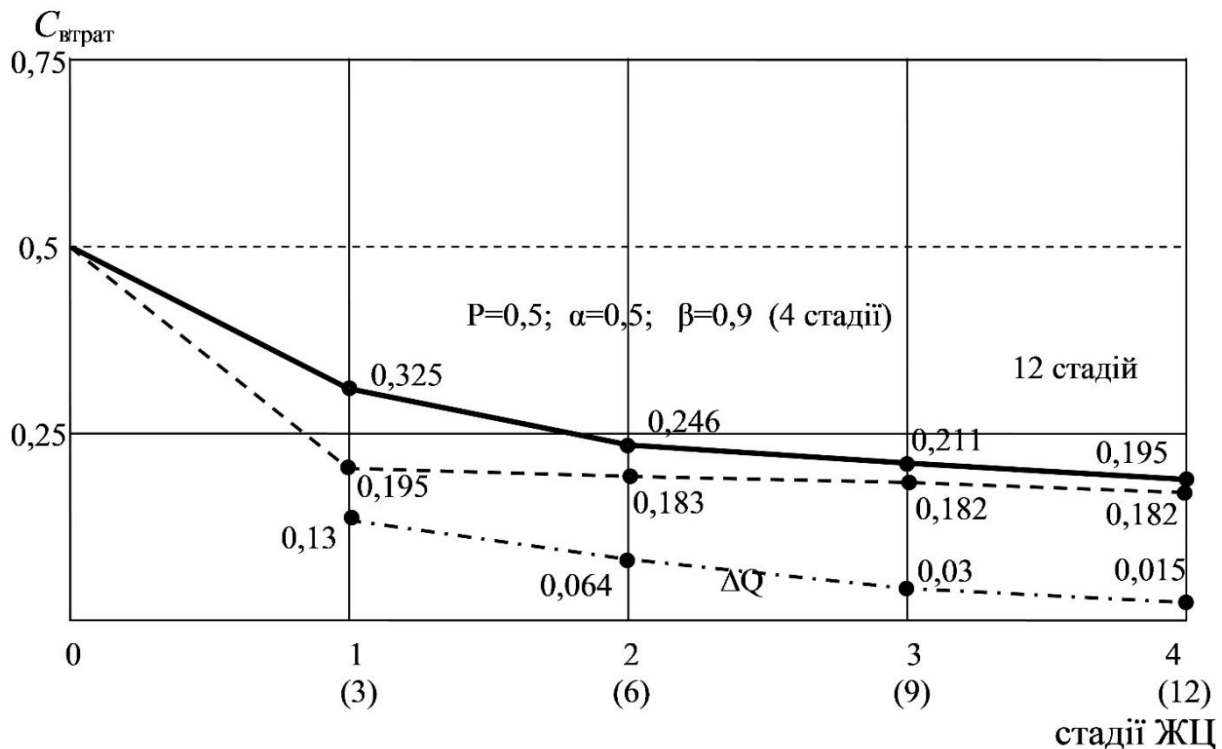


Рис. 2. Відносні втрати надійності залежно від кількості контрольованих стадій ЖЦ

На рис. 3 показана різниця у витратах для усунення причин і наслідків ненадійності за чотирьох і дванадцяти стадій життєвого циклу системи, отриманої в припущенні, що вартість доопрацювання документації і обладнання ТРС від стадії до стадії зростає приблизно на порядок. Незважаючи на зменшення різниці ΔQ_i з переходом від стадії до стадії, втрати від ненадійності за реалізації дванадцяти-стадійної програми робіт менші приблизно в 1,5 раза, ніж за чотирьохстадійної програми.

Розглянутий приклад характеризує якісне подання розподілу втрат по стадіях

життєвого циклу ТРС. Для більш детального дослідження конкретних багатостадійних програм доцільно використовувати статистичні моделі.

Для створення дорогих унікальних складних систем, таких як ТРС, найбільший ефект в економії матеріальних, вартісних і строкових ресурсів за інших рівних умов дає поділ складного процесу створення та експлуатації системи на більшу кількість контрольованих стадій, поступово впроваджуючи моніторинг технічного стану обладнання ТРС.

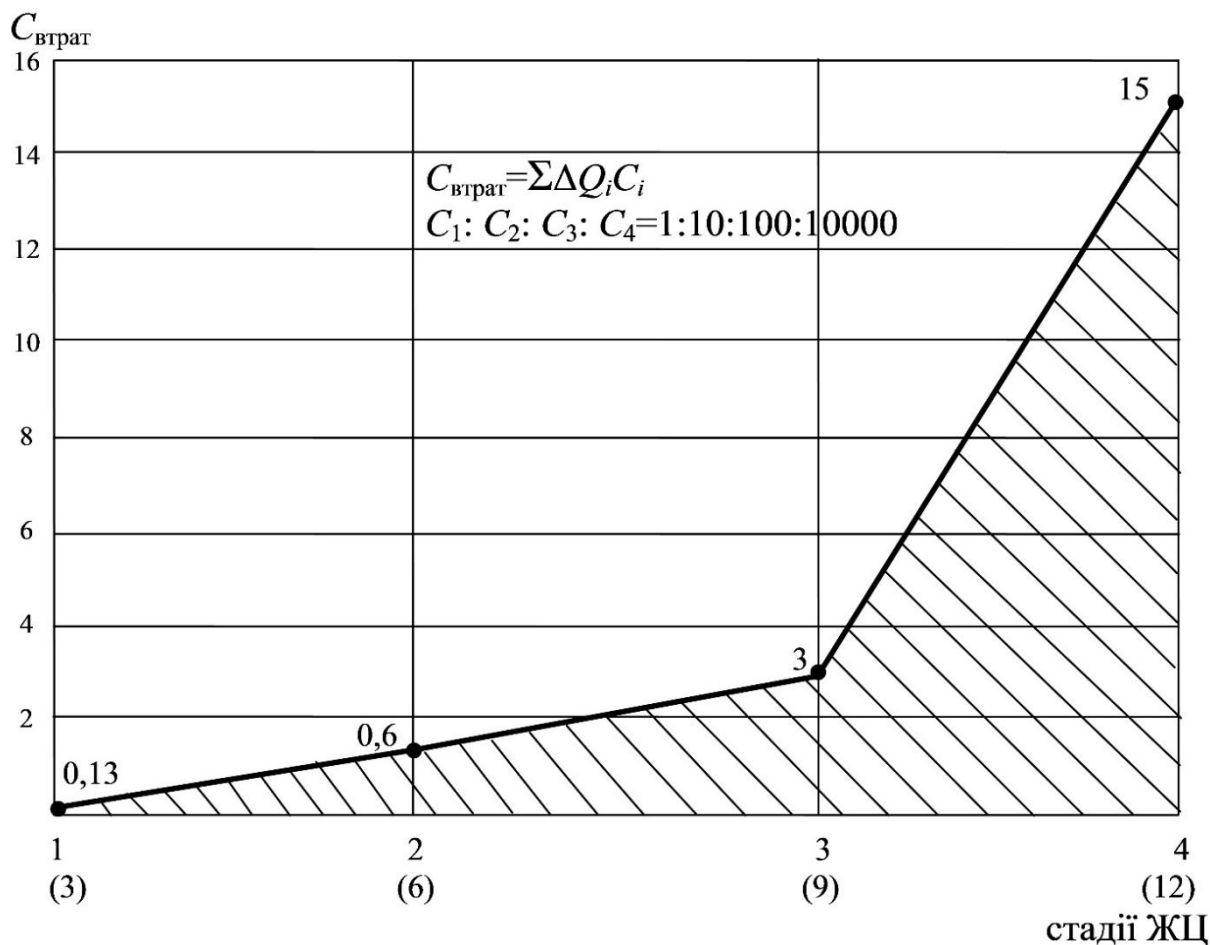


Рис. 3. Динаміка економічного ефекту залежно від кількості контрольованих стадій ЖЦ

Очевидно, що з введенням кожної контрольованої стадії в процес потрібен додатковий час на збір інформації, аналіз отриманих результатів і вироблення керуючих впливів, а також додаткові витрати матеріально-технічних і вартісних ресурсів. Тому поділ процесу на кількість стадій більше дванадцяти може бути виправданий тільки для надскладних унікальних систем, відмови яких зовсім неприпустимі [2, 8]. Зі створенням простих систем, за якими є великий досвід аналогічних розробок, доцільно скорочувати кількість контрольованих стадій без зашкодження надійності.

Висновки. За результатами проведених досліджень із моделювання

надійності роботи ТРС за життєвий цикл отримано такі результати:

1. Сформовано модель надійності роботи ТРС на всіх стадіях життєвого циклу.
2. Оцінено динаміку рівня надійності ТРС залежно від кількості стадій життєвого циклу.
3. Оцінено рівень витрат, що забезпечують високий рівень надійності за стадіями життєвого циклу.

Наведена методика може бути використана для оцінювання надійності будь-якої системи локомотива, у якій є дискретна структура функціонування.

Список використаних джерел

1. Капіца М. І., Коренюк Р. О. Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2012. Вип. 40. С. 63—67.
2. Калабухін Ю. Є. Теоретичні положення оцінки техніко-економічних показників функціонування тягового рухомого складу протягом життєвого циклу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: науковий журнал*. 2010. № 1, Ч. 2. С. 75—80.
3. Понтиселли К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава: от теории к практике. *Техника железных дорог*. 2009. № 4 (8). С. 19-24.
4. Організація технологічних процесів ремонту ТРС із застосування засобів діагностування / І. Г. Крашенинін, О. С. Крашенінін, В. Г. Пузир, А. П. Фалендиш. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2004. Вип. 57. С. 31—34.
5. Крашенінін О. С., Пузир В. Г., Крашчанін І. Г. Автоматизована розробка технологічних процесів обслуговування тепловозів за допомогою ПЕОМ. *Міжвуз. зб. наук. праць ХарДАЗТ*. Харків: ХарДАЗТ, 2000. Вип. 41. С. 42—47.
6. Крашенінін О. С., Яковлев С. С., Шапатіна О. О. Обґрунтування стратегії організації технічного обслуговування, поточного ремонту швидкісного рухомого складу в умовах України. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. Т. 26. № 3. С. 7—11. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i3.240449>.
7. Крашенінін О. С., Яковлев С. С., Задесенець В. І. Обґрунтування критерію ефективності експлуатації локомотивів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 4. С. 10—14. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v25i4.217755>.
8. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог: монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин и др. Луганск: «Ноулидж», 2011. 174 с.

Крашенинін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0001-7462-3372. E-mail: krashenin@kart.edu.ua.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-9185-6212. E-mail: shapatina@kart.edu.ua.

Васьковський Артем Анатолійович, магістрант освітньо-наукової програми «Локомотиви та локомотивне господарство», Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: vma0308@gmail.com.

Миколаєнко Дмитро Олександрович, магістрант освітньо-наукової програми «Локомотиви та локомотивне господарство», Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: mikolaenko.dima2710@gmail.com.

Шпортак Михайло Володимирович, магістрант освітньо-наукової програми «Локомотиви та локомотивне господарство», Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: mickshportak@gmail.com.

Krashenin Oлександр Semenovich, D.Sc. (Tech), Professor, Department of Operation and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0001-7462-3372. E-mail: krashenin@kart.edu.ua.

Shapatina Olga Oлександрivna, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Management of Freight and Commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-9185-6212.

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

Vaskovkyi Artem Anatoliiovych, master student, educational level Master-scientist «Locomotives and locomotive facilities», Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: vma0308@gmail.com.

Mykolaenko Dmytro Oлександрovych, master student, educational level Master-scientist «Locomotives and locomotive facilities», Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: mikolaenko.dima2710@gmail.com.

Shportak Mykhailo Volodymyrovych, master student, educational level Master-scientist «Locomotives and locomotive facilities», Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: mickshportak@gmail.com.

Статтю прийнято 27.03.2025 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.11

ТРАНСПОРТНА МОДЕЛЬ ТА ЇЇ СТВОРЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ

Канд. техн. наук І. О. Хітров

TRANSPORT MODEL AND ITS DEVELOPMENT IN THE MACROMODELING ENVIRONMENT

PhD (Tech.) I. Khitrov

Анотація. У сучасних умовах розвитку інфраструктури, назрілих змін в організації транспортної діяльності та значного транспортного насичення виникає необхідність у створенні ефективних транспортних моделей для планування та управління такими системами. Транспортна модель є інструментом, за допомогою якої досліджують, аналізують і прогнозують взаємодію між різними компонентами транспортної системи з урахуванням поведінки учасників руху, обсягів перевезень і впливу непередбачуваних зовнішніх чинників. У статті розглянуто основні принципи створення транспортних моделей у середовищі макромодельовання, підходи для збору та обробки вхідних даних, а також приклади практичного застосування моделей для планування та оптимізації транспортної діяльності.

Ключові слова: транспортна система, інфраструктура, транспортна модель, модельовання, оптимізація.

Abstract. In the modern context of infrastructure development, the need for change in the organization of transport activities, and significant transport saturation, there arises a necessity to create effective transport models for planning and managing such systems. A transport model is a tool that allows the exploration, analysis, and prediction of interactions between different components of a transport system, considering the behavior of traffic participants, transportation volumes, and the impact of unforeseen external factors.

One of the most common approaches to creating such models is the use of modeling methods, which allow for the evaluation of general patterns in the functioning of a transport system at the city or regional level, identifying key problem areas, and developing strategies for their resolution.

Thanks to the possibility of virtual experimentation, transport modeling helps to avoid financial costs and risks associated with real-world changes, and answers the question «what will happen if?».

This article discusses the process of creating a transport model, highlighting the main stages of its construction, including data collection and processing, model calibration, and modeling of various development scenarios. The advantages of using models are revealed, particularly in forecasting the consequences of management decisions, implementing infrastructure projects without risks and costs, optimizing transport flows to achieve the best results, and many other areas.

Special attention is given to the practical aspects of applying software tools for modeling, which allow for the creation of detailed transport system models, analysis of various infrastructure

development scenarios, and the prediction of their changes. The use of such tools ensures calculation accuracy, simplifies the planning process, and helps to make well-grounded management decisions.

This article is relevant and useful both for the scientific community and practitioners in the field of transport planning.

Keywords: *transport system, infrastructure, transport model, modeling, optimization.*

Вступ. Транспорт діє як система засобів, технологій та організаційних структур, призначена для перевезення пасажирів, вантажів з однієї точки в іншу з метою забезпечення мобільності, економічного обміну та соціальної інтеграції [1]. Транспортна інфраструктура (сукупність об'єктів, споруд, засобів і систем) забезпечує функціонування транспорту для здійснення перевезень пасажирів і вантажів і є матеріальною основою для організації транспортного процесу [2].

Транспортна модель – це засіб, за допомогою якого вивчають, оцінюють і передбачають, як різні елементи транспортної системи взаємодіють між собою. Вона враховує особливості поведінки учасників дорожнього руху, обсяги пасажиро- та вантажопотоків, а також вплив зовнішніх умов, таких як економічні, соціальні та екологічні чинники [3].

Одним із найбільш поширених підходів для створення таких моделей є використання методів макромодельовання, за яким оцінюють загальні закономірності функціонування транспортної системи на рівні міста або регіону, визначають основні проблемні зони та розробляють стратегії для їх вирішення [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Транспортне модельовання є невід'ємною складовою сучасного планування, що дає змогу ухвалювати обґрунтовані рішення про розвиток інфраструктури, логістичне забезпечення, організації перевезень, покращення безпеки та ефективність транспортних систем і набуває все більшої популярності.

Науковці М. М. Осетрін, Д. О. Беспалов, М. І. Дорош описують основні принципи створення і роботи транспортної моделі, яка складається з інформаційних і розрахункових блоків. Інформаційні блоки зберігають дані про транспортну мережу та попит, тоді як розрахункові блоки реалізують алгоритми для аналізу та прогнозування транспортних потоків [5].

Сучасні наукові роботи зосереджені на вдосконаленні математичних моделей для аналізу транспортних потоків, наприклад пропонувано використання Марківських моделей для великомасштабного аналізу та симуляції транспортних потоків, щоб більш точно прогнозувати розподіл транспортних засобів у мережі [6].

Модельовання вантажних перевезень є критично важливим для оптимізації логістичних процесів і підвищення ефективності транспортних систем. Досліджено, що розроблення моделей з урахуванням впливу глобальних ризиків на транспортні системи сприяє підвищенню стійкості та адаптивності логістичних ланцюгів (на основі теорії графів, алгоритмів Форда-Фалкерсона та Дініца запропоновано модифікований алгоритм визначення структури транспортних перевезень) [7].

Визначення мети та завдання дослідження. Головна мета дослідження полягає у висвітленні основних принципів побудови транспортної моделі в середовищі макромодельовання. Для досягнення сформульованої мети опишемо концепцію транспортної моделі та роль макромодельовання в аналізі транспортних систем, проаналізуємо основні підходи і методи створення транспортних моделей, розглянемо програмні засоби та

інструменти для ефективного аналізу, прогнозування та оптимізації таких систем.

Основна частина дослідження.

Моделювання широко використано в науці, техніці, економіці, медицині, транспорті та багатьох інших сферах для вирішення складних завдань і вдосконалення процесів. Це процес створення моделі, використовуваної для аналізу або прогнозування поведінки реальної системи. Моделювання дає змогу проводити експерименти без ризиків і витрат, отримувати відповіді на запитання «що станеться, якщо?»; прогнозувати наслідки певних дій або змін; оптимізувати системи для досягнення найкращих результатів. Це підтверджено численними дослідженнями та практичним досвідом у галузі транспортного моделювання [4-7]. Потреба в моделюванні транспортних процесів і систем зумовлена необхідністю вдосконалення організації та оптимізації транспортної діяльності. Воно дає змогу прогнозувати, аналізувати і покращувати різні компоненти транспортних систем, що є важливим для забезпечення ефективності, безпеки та екологічної стійкості перевезень [8].

Транспортне моделювання є процесом створення і використання моделей для аналізу, прогнозування та оптимізації транспортних систем. Модель у цьому контексті є абстракцією реальної транспортної системи, яка відображує її основні характеристики, структуру і функціонування. Транспортну модель, як математичне або концептуальне відображення транспортної системи (процесу), використовують для аналізу, прогнозування та оптимізації транспортного середовища, вона відображує взаємодію між попитом на перевезення і пропозицією транспортної інфраструктури. Структура транспортної моделі охоплює відбір даних, побудову математичних або програмних моделей, розроблення алгоритмів для їх

вирішення та аналіз отриманих результатів для ухвалення обґрунтованих рішень (рис. 1).

Розглядаючи транспортне моделювання з позиції «чорної скриньки» зазначимо, що основна увага зосереджена на підході, у якому внутрішні механізми та алгоритми моделі не розглядають детально, а натомість акцент зроблено на вхідних даних, вихідних результатах і взаємозв'язку між ними.

У цьому випадку модель сприймають як «чорну скриньку», що перетворює певні вхідні параметри на вихідні результати, не потребуючи пояснення проміжних процесів. Такий підхід є корисним для швидкого аналізу та прогнозування транспортних ситуацій, не заглиблюючись у складні алгоритмічні деталі. Однак для критично важливих рішень може потребувати більш «прозорого» підходу для аналізу внутрішніх процесів моделі.

Переваги підходу «чорної скриньки» полягають у простоті використання (користувачі можуть отримати результати, не розуміючи складних внутрішніх алгоритмів), швидкому моделюванні (фокус на результатах дає змогу швидко аналізувати різні сценарії), гнучкості (можна застосовувати для різних завдань).

Недоліки підходу «чорної скриньки» проявляються в недостатній прозорості (неможливо зрозуміти, як саме модель обробляє дані, що ускладнює діагностику помилок), наявності точних даних (результати сильно залежать від якості вхідних даних), складності корегування (якщо модель видає неправильні результати, важко визначити причину).

Загалом метод «чорної скриньки» є потужним інструментом для спрощення складних систем і процесів, але його застосування потребує обережності та ретельного оцінювання потенційних ризиків та обмежень.



Рис. 1. Структурування транспортної моделі

Транспортна модель стає необхідною, коли для рішення потрібні системний аналіз, кількісне оцінювання, а також прогнозування змін у транспортній системі в умовах обмежених ресурсів або високої складності взаємодій. Вона широко використовується в плануванні транспортної інфраструктури або моделюванні впливу змін у транспортній мережі (розроблення нових доріг, мостів, транспортних вузлів, будівництво кільцевої дороги), урбанізації та розвитку міста з урахуванням транспортної доступності (оцінювання впливу нових житлових, комерційних або промислових зон на транспортну систему), прогнозуванні транспортного попиту (аналіз змін у попиті на транспортні послуги через зростання населення або економічний розвиток або оцінювання завантаженості доріг), організації дорожнього руху (оптимізація схем дорожнього руху, розроблення заходів для зменшення заторів і підвищення безпеки), екологічного моніторингу (зниження викидів шкідливих речовин від транспорту, оцінювання впливу нових проєктів на екологію та якість повітря), економічної ефективності (аналіз економічної доцільності транспортних проєктів, оптимізації транспортних витрат для вантажних перевезень), плануванні дій у надзвичайних ситуаціях (розроблення моделей евакуації населення у випадках надзвичайних ситуацій, моделювання впливу аварій або реконструкцій на потоки транспорту), впровадженні інновацій (тестування впливу нових видів транспорту, аналіз ефективності нових технологій), розвитку громадського транспорту (розроблення нових маршрутів, графіків або змін у тарифній системі), реалізації соціальних потреб (забезпечення транспортної доступності для віддалених або малонаселених районів, аналіз впливу транспорту на якість життя і мобільність населення) тощо (рис. 2).

Робота з транспортною моделлю – це ітеративний процес, що включає

систематичний збір даних, моделювання, аналіз і вдосконалення рішень для транспортної системи, де кожен етап важливий для точності результатів і ефективності ухвалених рішень (рис. 3). Використання сучасних програмних засобів допомагає реалізувати ці етапи, створюючи точні та надійні моделі транспортних систем.

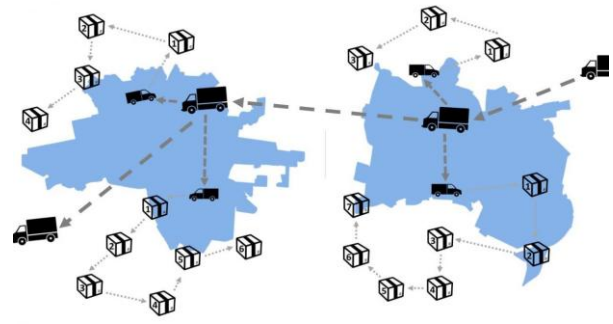
Саме чітка послідовність дій у роботі з транспортною моделлю забезпечує системний підхід для аналізу та вирішення транспортних проблем шляхом визначення цілей і завдань (чітке формулювання проблеми або потреби в її використанні), збору, обробки та верифікації даних (соціально-економічних, транспортних, поведінкових тощо), створення транспортної мережі, моделювання попиту на транспорт, наступного калібрування з валідацією моделі, аналізу сценаріїв і прогнозування, розробленням рекомендацій.

Правильна послідовність дій допомагає побудувати модель, яка буде адаптована до змін, наприклад змін транспортного потоку або нових технологій. Якщо модель спочатку розроблена за чітким планом, її буде простіше оновлювати, що забезпечить її актуальність у майбутньому. Точні прогнози та моделювання різних сценаріїв розвитку можуть бути здійснені лише після того, як усі попередні етапи правильно завершені. Це дасть змогу оцінити наслідки змін без ризиків і фінансових витрат.

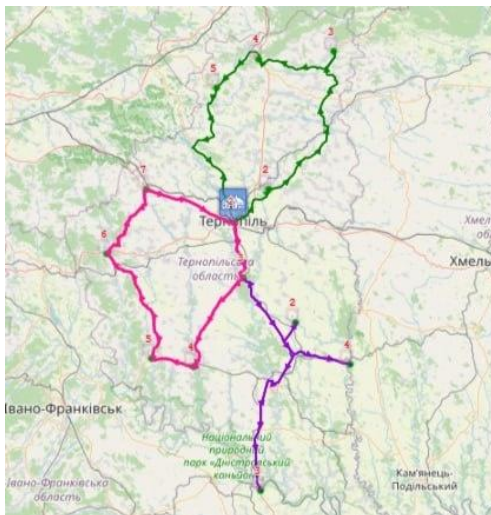
Необхідною умовою для створення надійної транспортної моделі є взаємопов'язані та обов'язкові умови верифікації (внутрішня коректність моделі та програмної реалізації), калібрування (налаштування параметрів для досягнення точних результатів) і валідації (зовнішня відповідність результатів моделі реальним умовам) (табл. 1).



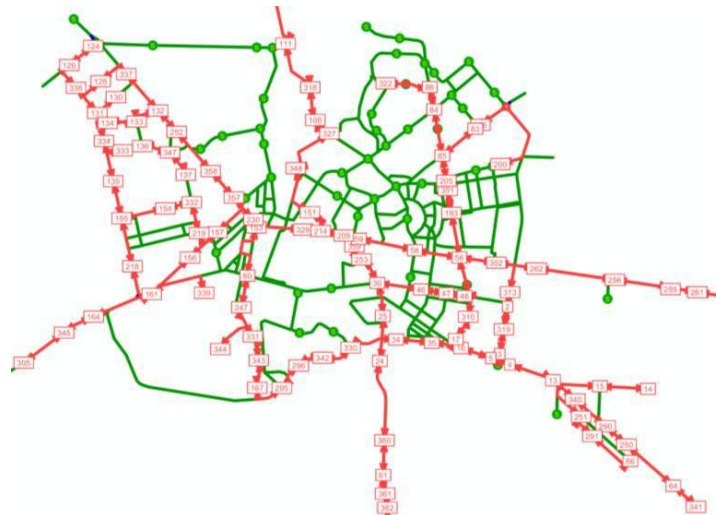
а



б



в



г

Рис. 2. Окремі приклади (елементи) реалізації транспортного моделювання:
а – перехрестя з круговим рухом; б – логістичне забезпечення регіону;
в – маршрутизація вантажних перевезень; г – організація міської пасажирської маршрутної системи

Верифікація моделі передбачає перевірку коректності внутрішньої структури моделі, її алгоритмів і програмного коду, щоб переконатися, що модель правильно реалізована і виконує математичні або логічні розрахунки згідно з поставленими вимогами.

Головна суть калібрування транспортної моделі полягає в налаштуванні параметрів моделі так, щоб її результати максимально точно відповідали реальним умовам транспортної системи.

Калібрування є необхідним етапом, оскільки навіть найскладніші моделі працюють на основі припущень і спрощень, які можуть не повністю відображувати дійсність. Наприклад, якщо модель прогнозує, що на певній ділянці дороги щоденно проїжджає 10 тисяч автомобілів, а реальні дані показують 12 тисяч, то через калібрування модель буде налаштована так, щоб урахувати додаткові чинники (наприклад вищий попит або більшу пропускну спроможність).



Рис. 3. Поетапність роботи з транспортною моделлю міста [3]

Таблиця 1

Відмінності між верифікацією, калібруванням і валідацією транспортної моделі

Критерій	Верифікація	Калібрування	Валідація
1	2	3	4
Основна мета	Перевірка правильності реалізації моделі (алгоритми, код)	Налаштування параметрів моделі для зменшення відхилень від реальних даних	Перевірка відповідності результатів моделі реальним даним
Основне питання	«Чи правильно побудована модель?»	«Як налаштувати модель для більшої точності?»	«Чи правильно модель відображує реальність?»
Що перевіряють	Логіка, математичні залежності, програмний код	Параметри моделі та їхній вплив на результати	Точність прогнозів і результатів моделі

Продовження табл. 1

1	2	3	4
Методи перевірки	Тестування, аналіз коду, перевірка алгоритмів	Підбір і налаштування параметрів на основі реальних даних	Порівняння результатів моделювання з фактичними даними
Інструменти	Контрольні тести, аналітичні обчислення, огляд коду	Статистичні методи, оптимізація параметрів	Статистичні метрики (середньоквадратична, абсолютна помилка, кореляція тощо)
Етап роботи	На початкових етапах розроблення моделі	Після верифікації, перед валідацією	На завершальному етапі моделювання
Результат	Коректно реалізована модель	Параметри моделі налаштовані для точних результатів	Модель підтверджена як надійна та реалістична

Порівнюють дані (валідація) транспортної моделі з метою перевірки точності, надійності та адекватності моделі для опису реальної транспортної системи. Під час валідації модель порівнюють із реальними даними, щоб оцінити, наскільки її результати відповідають дійсності, а сама вона гарантує обґрунтованість і надійність ухвалених рішень на її основі; виявляють її слабкі місця перед використанням, що підвищує довіру до моделювання серед замовників, фахівців і громадськості. Валідація є завершальним етапом побудови транспортної моделі, який підтверджує, що

модель достовірно відображує реальну транспортну систему і придатна для аналізу та прогнозування.

Для транспортного моделювання пропонувано сучасні інструменти у вигляді програмних комплексів, що дають змогу аналізувати і прогнозувати транспортні потоки, поведінку користувачів транспорту і ефективність транспортної інфраструктури. Ці інструменти допомагають у вирішенні завдань транспортного планування, оптимізації руху та оцінювання впливу інфраструктурних рішень (табл. 2).

Таблиця 2

Популярні інструменти сучасного транспортного моделювання [9, 10]

Назва програмного забезпечення	Рівень моделювання	Призначення	Особливості
PTV VISUM	макроскопічний	стратегічне планування, моделювання громадського транспорту	дає змогу будувати транспортні моделі великих міст і регіонів
PTV VISSIM	мікроскопічний	моделювання руху на перехрестях, пішохідних потоків та поведінки окремих транспортних засобів	деталізоване моделювання світлофорів, заторів, динамічного руху

Продовження табл. 2

1	2	3	4
Aimsun Next	макро-, мезо- та мікроскопічний	моделювання міських та міжміських транспортних систем	гібридне моделювання з високою гнучкістю і деталізацією
SUMO	мікроскопічний	моделювання міських транспортних потоків у реальному часі	безкоштовний інструмент із відкритим кодом
CUBE	макроскопічний	прогнозування попиту на транспортні послуги та стратегічне планування	аналізує транспортні мережі та взаємодію між регіонами
MATSim	агентиорієнтований	моделювання поведінки користувачів транспорту (поїздки, вибір маршруту)	гнучка платформа для великих транспортних досліджень
TransCAD	макроскопічний	просторовий аналіз та моделювання транспортних потоків	інтегрована ГІС-система для роботи з транспортними даними

Перевагою сучасних інструментів транспортного моделювання є їхня висока деталізація (можливість аналізувати потоки на рівні окремих транспортних засобів або пасажирів), гнучкість (можливість створення різних сценаріїв для аналізу змін у транспортній мережі), візуалізація (наочне відображення результатів моделювання у вигляді графіків, карт, анімації), інтеграція з іншими системами (можливість використовувати ГІС-дані та інші інструменти), висока ефективність планування (допомагають оцінити ефективність інфраструктурних проєктів до їх реалізації).

Однією з головних переваг програмного моделювання є можливість віртуального тестування різних сценаріїв без реальних витрат і ризиків. Наприклад, можна протестувати нові маршрути, зміни в інфраструктурі або правилах руху, щоб оцінити їхній вплив на транспортні потоки, без необхідності впроваджувати зміни в реальній системі; знизити ймовірність людських помилок з плануванням транспортної мережі та забезпечити більш

системний підхід для управління транспортом.

Висновки. Створення транспортної моделі в середовищі макромоделювання є сучасним інструментом, що дає змогу ефективно аналізувати транспортні потоки, планувати розвиток транспортної інфраструктури та прогнозувати наслідки різних сценаріїв управління мережами. Завдяки можливості віртуального експериментування транспортне моделювання дає змогу уникнути фінансових витрат і ризиків, пов'язаних із реальними змінами, і відповісти на запитання «що станеться, якщо?».

Отже, розроблення та впровадження транспортних моделей у середовищі макромоделювання є важливим інструментом для сталого розвитку урбанізованих територій. Подальше вдосконалення методів та інтеграція з інноваційними технологіями у вигляді програмних засобів відкривають нові можливості для підвищення ефективності та точності прогнозування в транспортному плануванні.

Список використаних джерел

1. The 6 Types of Transportation in Logistics. *Inboundlogistics*: веб-сайт. URL: <https://www.inboundlogistics.com/articles/transportation-in-logistics/>.
2. The Importance of Designing Effective Urban Transportation Infrastructure. *Acb Consulting Services*: веб-сайт. URL: <https://www.acbconsultingservices.com/construction-management-for-transportation/what-is-transport-infrastructure-and-what-types-of-transport-infrastructure-should-we-plan/>.
3. Транспортні моделі міст. *Про мобільність*: веб-сайт. URL: <https://pro-mobility.org/transportni-modeli-mist/>.
4. Joni Arliansyah, Muhammad Rizky Prasetyo, Astri Yuli Kurnia. Planning of City Transportation Infrastructure Based on Macro Simulation Model. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. 2017. 7(4):1262. URL: https://www.researchgate.net/publication/319403908_Planning_of_City_Transportation_Infrastructure_Based_on_Macro_Simulation_Model.
5. Осетрін М. М., Беспалов Д. О., Дорош М. І. Основні принципи створення транспортної моделі міста. *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2015. Вип. 57. С. 309–320. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/bitstreams/966e763f-8870-4407-bc49-0ef9ab627c6c/download>.
6. Renátó Besenczi, Norbert Bátfai, Péter Jeszenszky, Roland Major, Fanny Monori, Márton Ispány. Large-scale Analysis and Simulation of Traffic Flow using Markov Models. *PLoS ONE*. 2021. 16(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246062>.
7. Моделювання транспортно-логістичних схем вантажних перевезень в умовах глобальних ризиків / О. В. Шарко, А. В. Букетов, К. М. Клевцов та ін. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 3 (100). С. 94–105. [http://dx.doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17899](http://dx.doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17899).
8. Хітров І. О. Ключові аспекти моделювання транспортних процесів і систем. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: збірник тез XVII Міжнар. наук.-практ. конфер., 21-23 жовтня 2024 року*. Житомир: Житомирська політехніка, 2024. С. 237–238. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/237.pdf>.
9. Hantong Wang, Ziyi Shi, Yong Chen, Zheng Zhu, Xiqun Chen. Transportation Simulation Modeling and Location-Based Services Data Completion Based on a Data and Model Dual-Driven Approach. *Applied Sciences*. 2024. 14. 4366. <https://doi.org/10.3390/app14114366>.
10. Любий Є. В., Пономарьова Н. В., Чернишова О. С. Транспортне планування міст: сучасні інструменти транспортного моделювання автотранспортних систем. *Комунальне господарство міст*. 2016. Вип. 128. С. 76–82. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/43470/1/4776-9493-1-SM.pdf>.

Хітров Ігор Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0003-2310-1472. Тел.: +38 (099) 295-97-70. E-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Ihor Khitrov, PhD (Tech). Associate Professor, department of the Transport Technology and Technical Service, National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0003-2310-1472. Tel.: +38 (099) 295-97-70. E-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Статтю прийнято 05.02. 2025 р.

УДК 656.614.32:621.564.27

**ТЕХНОЛОГІЯ ТИМЧАСОВОГО ПЕРЕОБЛАДНАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ
КЛАСИЧНОГО КОНТЕЙНЕРА В РЕФРИЖЕРАТОРНИЙ ШЛЯХОМ
ВСТАНОВЛЕННЯ ТЕРМОВКЛАДИШУ ТА КРІОГАЗИФІКАТОРА ЗІ ЗРІДЖЕНИМИ
КРІОГЕННИМИ РЕЧОВИНАМИ**

Канд. техн. наук О. Г. Слинко, асп. В. А. Столянов

**TECHNOLOGY OF TEMPORARY CONVERSION AND USE OF A CLASSIC
CONTAINER INTO A REFRIGERATED CONTAINER BY INSTALLING A THERMAL
LINER AND A CRYOGASIFIER WITH LIQUEFIED CRYOGENIC SUBSTANCES**

PhD (Tech.) O. H. Slynko, postgraduate student V. A. Stolianov

***Анотація.** У статті наведено пропозицію альтернативи замість уже наявних рефрижераторних контейнерів, напівпричепів та інших інтермодальних транспортних одиниць, яких на світовому ринку часом не вистачає, на короткі та середні відстані класичних інтермодальних транспортних одиниць для перевезення деяких категорій продовольчих вантажів, що потребують температурного охолодження.*

На основі аналізу властивостей рідкого азоту як холодоагенту було подано технологічні операції з тимчасового переобладнання стандартної інтермодальної транспортної одиниці в рефрижераторну шляхом встановлення всередину інтермодальної транспортної одиниці термовкладишу та подальшого монтажу кріогенної установки, що складається з вакуумних трубок і кріогенного газифікатора з автоматичним клапаном регулювання подавання рідкого азоту в систему охолодження на основі показань температурних датчиків, розміщених на стінках інтермодальної транспортної одиниці та всередині самого клапана. Визначено допустимі розміри газифікатора, який займатиме одне вантажне місце. Надано метод розрахунку витрат холодоагенту запропонованою кріогенною установкою в заданих кліматичних умовах. За методом передбачено розрахунок теплового потоку, що поступає всередину інтермодальної транспортної одиниці із зовнішнього середовища, шляхом визначення коефіцієнта теплопередачі, сумарної зовнішньої площі поверхні транспортної одиниці під час руху на палубі морського чи річкового судна (автомобіля-контейнеровоза, залізничної контейнерної платформи) і температурного напору між повітрям всередині транспортної одиниці і зовні. За допомогою спеціального програмного забезпечення розраховано інтервальний час між подаванням холодоагенту і погодинні витрати рідкого азоту для заданого вантажу, що дало змогу визначити добові витрати холодоагенту, кількість подавання його протягом доби та в підсумку отримати час рейсу, за який кріогенний газифікатор повністю використає максимально можливий об'єм холодоагенту без додаткового дозаправлення.

***Ключові слова:** рідкий азот, контейнер, інтермодальна транспортна одиниця, термовкладиш, теплота, кріогенна установка, продовольчі вантажі.*

***Abstract.** This paper presents a proposal to use classical intermodal transport units for short and medium distances instead of existing refrigerated containers, semi-trailers and other intermodal transport units, which are sometimes in short supply on the world market, for the transport of certain categories of foodstuffs requiring temperature cooling.*

Based on the analysis of the properties of liquid nitrogen as a refrigerant, the article presents technological operations for the temporary conversion of a standard intermodal transport unit into a refrigerated one by installing a thermal liner inside the intermodal transport unit and further installing a cryogenic unit consisting of vacuum tubes and a cryogenic gasifier with an automatic valve for regulating the supply of liquid nitrogen to the cooling system based on the readings of temperature sensors placed on the walls of the intermodal transport unit. The permissible dimensions of the gasifier, which will occupy one cargo space, are determined. A method for calculating the refrigerant consumption of the proposed cryogenic unit under specified climatic conditions is presented. The method provides for the calculation of the heat flux entering the intermodal transport unit from the external environment by determining the heat transfer coefficient, the total external surface area of the transport unit while moving on the deck of a sea or river vessel (container ship, railway container platform) and the temperature pressure between the air inside the transport unit and outside.

Subsequently, using special software, the interval time between refrigerant deliveries and the hourly liquid nitrogen consumption for a given cargo were calculated, which made it possible to determine the daily refrigerant consumption, the number of refrigerant deliveries per day and, as a result, to obtain the voyage time during which the cryogenic gasifier would fully use the maximum possible volume of refrigerant without additional refuelling.

Keywords: liquid nitrogen, container, intermodal transport unit, thermal liner, heat, cryogenic unit, food cargo.

Вступ. За даними Міжнародного інституту холоду, щорічно втрачають від 20 до 30 % усіх вироблених у світі продуктів харчування, що складає майже мільярд тонн. Із зазначеної кількості не менше 50 % – це швидкопсувні продукти, збереження яких можливе тільки за допомогою холоду, переважно овочі, плоди і ягоди, а також молочні продукти і кондитерські вироби [1].

Більшість харчових продуктів у процесі збереження може зазнавати небажаних змін. Найчастіше вони викликані мікроорганізмами, під впливом яких відбувається розпад складних хімічних речовин. У результаті з'являються нові, більш прості за складом речовини, що мають неприємний смак і запах. Консервуючи харчові продукти, можна припинити або сповільнити діяльність мікроорганізмів, а також зруйнувати ферментну систему і в такий спосіб запобігти небажаним змінам продуктів [2, 3].

Ураховуючи сучасні тенденції в перевезеннях продовольчих вантажів, використання рефрижераторних контейнерів, що перевозять різними видами транспорту без перевантаження продуктів,

дає змогу істотно підвищити ефективність холодильного ланцюга [4]. За допомогою контейнерів здійснюють внутрішні і міжнародні транспортні операції. У зв'язку з цим їхні масові, габаритні й конструктивні характеристики регламентовано стандартами Міжнародної організації зі стандартів, а також відповідними правилами міжнародних класифікаційних товариств.

Аналіз досліджень та публікацій. Питанням охолодження продовольчих вантажів і правильного процесу їх перевезення займалося багато науковців транспортного і харчового напрямів. У дослідженнях [1, 5-7] описано методи і засоби збереження продовольчих вантажів шляхом їх охолодження, замороження та консервування. У роботі [5] зазначено, що за швидкого заморожування продуктів біохімічні зміни в них протікають менш інтенсивно, уповільнюється розвиток мікроорганізмів, припиняється ферментативна активність, зменшуються втрати вологи продуктом, скорочуються природні втрати і відходи, зберігається якість продукції, збільшується термін її збереження. У роботі [6] основну увагу

приділено способам охолодження продуктів харчування, розглянуто охолодження за допомогою рідкого азоту. Зокрема, автор роботи вказує, що використанням рідкого азоту для перевезення продуктів, що швидко псуються, можна отримати суттєвий економічний ефект.

Наукові досягнення фахівців транспортної галузі подані в дослідженнях [8-10]. У роботі [8] автор досліджує загальні питання та вимоги щодо перевезення продовольчих вантажів (ПВ) автомобільним і залізничним транспортом. Автор стверджує, що тільки комплексне врахування нормативних вимог щодо ПВ, виробничо-технологічних параметрів, фізіологічних і фізико-механічних властивостей продукції, а також відповідний вибір тари та способів транспортування дають змогу забезпечити ефективне перевезення вантажів, що швидко псуються. У дослідженні [9] автори фокусують увагу на вдосконаленні рефрижераторних залізничних поїздів, зокрема визначено технічні вимоги до рухомого складу, використовуваних холодоагентів і надано рекомендації з ремонту і безпечної експлуатації таких поїздів. Що стосується саме інтермодальних транспортних одиниць (ІТО), то їхню якісну класифікацію надано в роботі [10].

Для нашого дослідження найбільш цікавим є класифікація ІТО за призначенням: ізотермічні контейнери (термоізововані, рефрижераторні з машинним охолодженням, рефрижераторні з холодоагентом, що самовідновлюється) і опалювані. На окрему увагу заслуговує робота [4], де детально описані конструкція, переваги і недоліки рефрижераторних контейнерів, використовуваних на морському транспорті, їхніх холодильних установок, а також наведено розрахунки теплових втрат таких контейнерів.

Мета і завдання дослідження. 90 % усіх контейнерів має машинне охолодження, оскільки воно надійне, універсальне і автономне [4]. Живлення

холодильної машини забезпечено від дизель-генератора або зовнішньої мережі 220/380 В, управління холодильною машиною повністю автоматизовано, включаючи перемикання режимів роботи (охолодження — опалювання). На рис. 1 зображено конструкцію класичного рефрижераторного контейнера з машинним охолодженням зі способом розміщення холодильного обладнання, циркуляції повітря та його поперечного розрізу [11].

При цьому використання рефрижераторних контейнерів є досить дорогим. Відомо, що кількість рефрижераторних контейнерів на ринку досить обмежена, а постійне забезпечення охолоджуваної машини енергією потребує від транспортного засобу чи складу додаткових витрат. Особливо це позначається для перевезень на короткі відстані. Також мало вивченим залишається використання кріотехнологій для перевезення. Науковці лише загально вказують на переваги та недоліки використання рідкого азоту чи іншого холодоагенту для доставлення швидкопсувних вантажів, у тому числі за допомогою рефрижераторних ІТО з холодоагентом [11]. На рис. 2 зображено типову рефрижераторну ІТО з рідким (азотним) охолодженням, а саме принципову схему і розташування азотної системи охолодження в контейнері.

Тому в цьому дослідженні пропонується використовувати класичні ІТО з їхнім додатковим тимчасовим переобладнанням (без встановлення фальш-стілки чи окремого відсіку для кріоємності) у рефрижераторні контейнери з системою охолодження за допомогою рідкого холодоагенту (рідкий азот, вуглекислота). Як холодоагент у дослідженні розглянуто рідкий азот. При цьому використання інших рідких холодоагентів (вуглекислота тощо) також допускається. Для досягнення мети сформульовано основні завдання:

- дати визначення характеристик вибраного холодоагенту щодо властивостей ПВ;

• розробити в першому наближенні технологічні операції з переобладнання класичного ІТО у рефрижераторний із його охолодженням рідким азотом, а також завантаження переобладнаного контейнера ПВ;

• опрацювати спосіб розрахунку витрат азоту і часу рейсової роботи запропонованого ІТО залежно від температури перевезення і тимчасового (у нештатних ситуаціях) зберігання вантажу і температури навколишнього середовища.

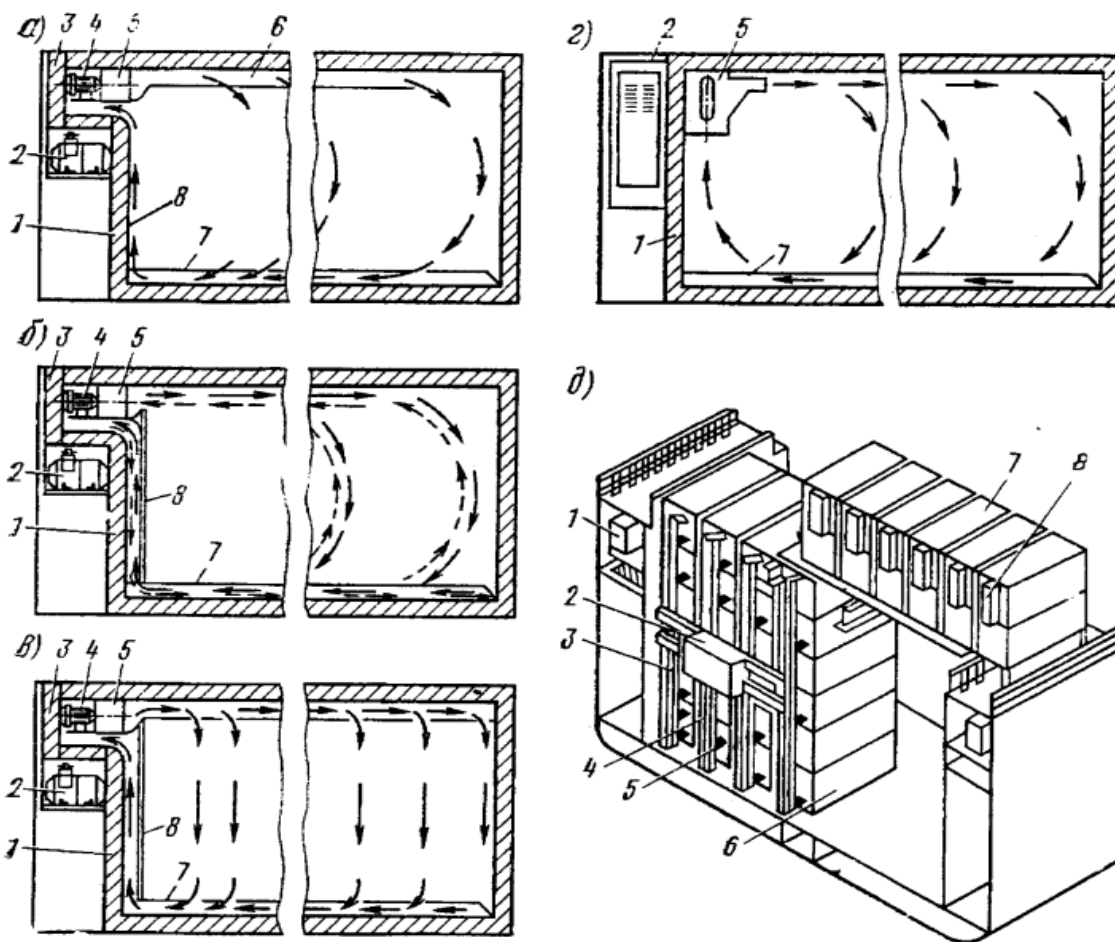


Рис. 1. Схема розміщення холодильного обладнання, циркуляції повітря та поперечного розрізу класичного рефрижераторного контейнера:

а – з подаванням повітря в контейнер через підвісні повітропроводи; б – те саме через щілину в торцевій стінці; в – те саме через підвісну стелю; г – з розташуванням повітроохолоджувача у вантажному відсіку: 1 – теплоізоляція; 2 – холодильна машина; 3 – знімна кришка; 4 – вентилятор; 5 – повітроохолоджувач; 6 – повітророзподільні канали; 7 – алюмінієва підлога; 8 – фальш-стінка; д – схема поперечного розрізу судна-контейнеровоза: 1 – суднова холодильна машина; 2 – повітроохолоджувач; 3, 4 – повітропроводи; 5 – з'єднувальна муфта; 6 – трюмний контейнер; 7 – палубний контейнер; 8 – автономна холодильна машина контейнера [11]

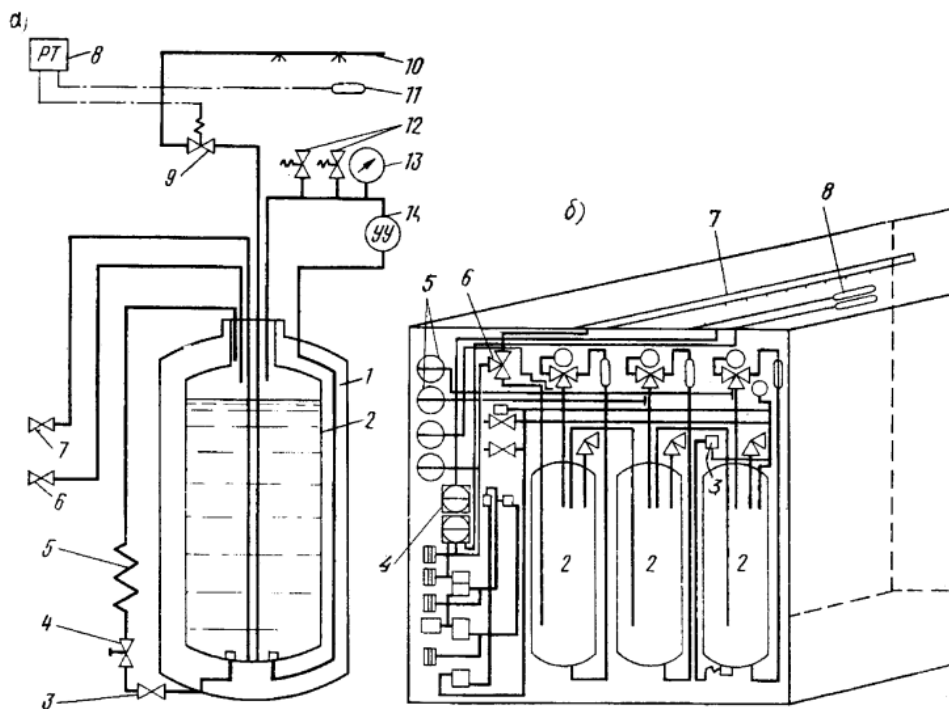


Рис. 2. Принципова схема і розташування азотної системи охолодження в контейнері:
 а – принципова схема: 1 – кожух резервуара; 2 – резервуар із холодоагентом; 3 – запірний вентиль; 4 – регулятор тиску; 5 – випаровувач; 6 – вентиль газоскиду; 7 – вентиль газонаповнення; 8 – термореле; 9 – соленоїдний вентиль; 10 – розпилювальний колектор; 11 – датчик термореле; 12 – запобіжні клапани; б – схема розташування азотної системи в контейнері: 1 – вантажний відсік; 2 – резервуари з азотом; 3 – регулятор тиску; 4 – регулятор температури; 5 – вимірювальні прилади; 6 – регулюючий вентиль; 7 – розпилювач; 8 – температурний датчик [11]

Основна частина дослідження.

Рідкий азот – рідина прозорого кольору. Є одним із чотирьох агрегатних станів азоту. Рідкий азот має питому густину 808 кг/м^3 і має точку кипіння $77,4 \text{ К}$. У вільному вигляді – газ без кольору, запаху і смаку, погано розчинний у воді. Складається з двоатомних молекул N_2 , що мають високу міцність [12]. Рідкий азот отримують у промисловому масштабі кріогенною перегонкою зрідженого повітря або скрапленням чистого азоту, отриманого з повітря з використанням адсорбції за змінного тиску. Повітряний компресор використано для стиснення відфільтрованого повітря високого тиску;

газ під високим тиском охолоджують до кімнатної температури, що дає змогу розширити його до низького тиску. Розширене повітря сильно охолоджується, унаслідок чого кисень, азот, аргон розділяються на наступних етапах розширення та дистиляції. Установка, на якій це відбувається, називається детандером. Дрібне виробництво рідкого азоту легко реалізувати за допомогою цього принципу [12]. Літр рідкого азоту, випаровуючись і нагріваючись до $20 \text{ }^\circ\text{C}$, утворює приблизно 700 л газу. З цієї причини рідкий азот зберігають у спеціальних посудинах Дьюара з вакуумною ізоляцією відкритого типу,

кріоциліндрах або кріогенних ємностях під тиском [12].

Рідкий азот використовують у різних галузях промисловості (кріогенне різання, металургія, виробництво аміаку), медицині та навіть пожежогасінні. Що стосується ПВ, то головними перевагами в застосуванні азоту вчені зазначають [13] його безпечність, відсутність смаку і запаху, хімічну інертність. Азот не змінює консистенцію чи колір продукту. У харчовій промисловості азот зареєстрований як харчова добавка Е-941 і є газовим середовищем для пакування і зберігання продукції, холодоагентом. Рідкий азот використовують для фасування рідин, створення надлишкового тиску й інертного середовища в пакуванні. Це спричинило переворот у пакувальній індустрії за останні роки і зростання попиту на генератори азоту [13].

До переваг рідкого азоту також відносять швидкість самого процесу охолодження, замороження вантажу, простоту технології та устаткування, а також можливість автоматизації всієї системи. Крім того, низькотемпературне зберігання в азотному середовищі ПВ запобігає небажаним змінам сировини під дією власних ферментів, мікроорганізмів і окиснювальних реакцій через контакт із киснем повітря [14]. Крім того, слід урахувати, що кріогенні установки мають невеликі габарити і високий ступінь використання об'єму. Для них характерна універсальність режиму роботи [14].

Основним недоліком використання рідкого азоту як холодоагенту, що знижує ефективність його застосування, є його висока вартість і великі витрати. Однак зараз у світі спостерігають тенденцію до здешевлення вартості рідкого азоту за рахунок того, що в газовій промисловості за виробництва кисню рідкий азот фігурує як побічний продукт. Його виробництво можна налагодити шляхом невеликих капіталовкладень [14].

Технологічні операції з переобладнання класичного ІТО у рефрижераторний. Визначивши основні характеристики рідкого азоту як холодоагенту, розроблено технологічні операції, що дають змогу перевозити рефрижераторні вантажі у звичайних класичних, але переобладнаних ІТО. Загалом запропоновані технологічні операції базовані на ідеях патентів [15-17], однак ця стаття має і суттєві відмінності від раніше зареєстрованих винаходів.

Початковою технологічною операцією є процес власне обладнання звичайного ІТО у рефрижераторний. Для переобладнання всередині контейнера встановлюють спеціальний термовкладиш, який має захистити вантаж від впливу зовнішніх чинників. У статті запропоновано використовувати термовкладиш на базі технології «THERMAL CONTAINER LINER» [18].

Термальний вкладиш вироблено з матеріалу, що являє собою металізовану PET-плівку зі світловідбивною здатністю, спініним PE з теплозахисною функцією, затемненим PE для уникнення просвічування ультрафіолетових променів. Критичною точкою інноваційної технології є також повна герметизація швів, що унеможливорює просвічування і потрапляння повітря, запобігаючи утворенню конденсату всередині вкладки. Теплові властивості вкладиша допомагають запобігти сильним перепадам температури, зберігати різницю зовнішнього середовища і середовища всередині термовкладиша в температурному інтервалі +15...+16 °C [18, 19]. Встановлення термовкладишу відбувається через двері. Сам процес повного розгортання становить від 10 до 15 хв.

Наступною технологічною операцією є завантаження вантажу в термовкладиш і розгортання системи розпилювання. Для розпилювання рідкого азоту всередині ізотермічного контейнера на даху встановлюють спеціальні гнучкі трубки з прорізами діаметром від 15 до 35 мм. Розміщення трубок, їх закріплення і

з'єднання в єдину систему відбувається за каналним принципом одночасно з завантаженням, ураховуючи схему розташування вантажних місць у контейнері. Канальний принцип полягає в розміщенні центрального трубопроводу по осі контейнера між вантажними місцями по довжині, який у свою чергу розділений на два невеличкі трубопроводи, встановлювані також між вантажними місцями по ширині. На рис. 3 схематично зображено розміщення трубок у контейнері.

Заключною технологічною операцією є встановлення кріюємностей із рідким азотом і підключення системи охолодження. Ємності з рідким азотом завантажують виключно на останнє вантажне місце біля дверей ІТО (на рис. 3 виділено сірим

кольором). Таке розташування є найкращим щодо безпеки та зручності. У випадку аварійної, небезпечної ситуації кріюємності можна оперативно вимкнути, перекривши ручний клапан подавання рідкого азоту і за необхідності оперативно від'єднати установку та винести її з контейнера. Самі ємності заздалегідь встановлено на спеціальну конструкцію, яка дає змогу закріпити їх усередині ІТО як і піддон вантажу, а також транспортувати на складському майданчику за допомогою навантажувача. Як тільки кріюємності встановлено, відбувається процес приєднання трубки центрального трубопроводу до зарядного клапана ємностей із рідким азотом (позначено цифрою 3 на рис. 1).

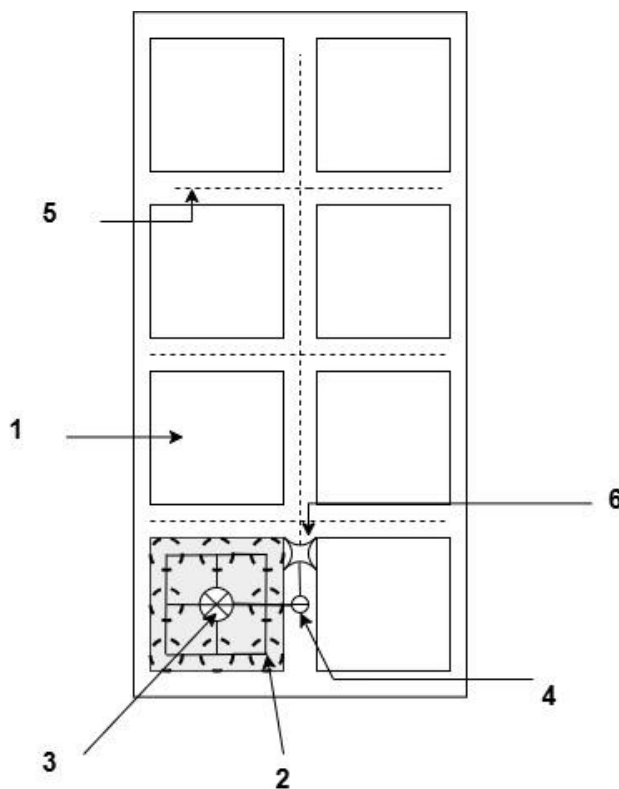


Рис. 3. Схематичне зображення розташування трубок охолодження на прикладі 20-футового контейнера:

- 1 – вантажне місце; 2 – кріюємність; 3 – ручний клапан кріюємності, він же зарядний;
- 4 – автоматичний клапан подавання азоту в систему охолодження;
- 5 – трубки розприскування рідкого азоту; 6 – сопло Лавалю

Далі відбувається приєднання трубопроводів, після чого працівники відкривають ручний клапан подавання, закривають термовкладиш і зачиняють двері контейнера. Після повного закриття дверей ІТО дистанційно вмикається автоматичний клапан подавання рідкого азоту в систему розпилення (позначено 4 на рис. 3). Автоматичний клапан оснащений термореле і маленьким комп'ютером, який регулює кількість азоту, що необхідно розпилити для досягнення необхідної температури.

Процес подавання рідкого азоту зображено на рис. 4. У балонах 1 знаходиться скраплений насичений азот під тиском 1,89 бар, його температура дорівнює мінус 190,09 °С, густина 808 кг/м³. Клапан 2 використовують для заправлення балонів скрапленим азотом, а також консервації установки. Подавання азоту здійснюється автоматичним імпульсно-соленоїдним

клапаном 4, керованим даними з термореле. Азот подають у звужувальну частину сопла Лавалю 6, швидкість його збільшується, а тиск зменшується. Проектуємо і виготовляємо таке сопло, щоб тиск у мінімальному перерізі сопла став менше за атмосферний (1 бар). Підводимо до цього перерізу повітропровід через триходовий клапан 5 із шиббером, що регулює витрати зовнішнього і внутрішнього контейнерного повітря, яке всмоктує сопло. Свіже повітря необхідне для перевезення «дихаючих» вантажів. Частину сопла, що розширюється, проектуємо і виготовляємо, задавшись температурою і тиском суміші азоту і повітря. Зрозуміло, що тиск суміші має бути дещо вище за атмосферний, а температура вище за температуру суміші, що подають у вантаж, оскільки з дроселюванням через отвори розподільної труби 7 її температура знижується.

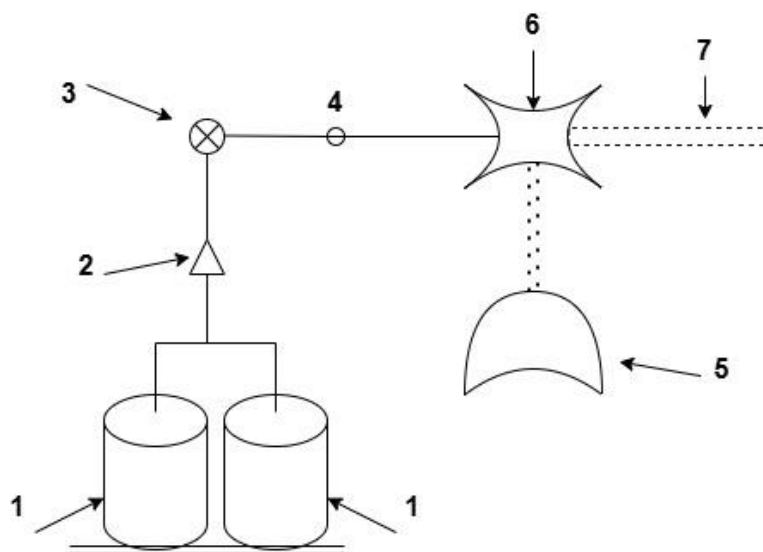


Рис. 4. Процес подавання рідкого азоту в систему охолодження ІТО:

- 1 – балони з рідким азотом; 2 – витратний (зарядний) клапан; 3 – запобіжний клапан;
4 – соленоїдний клапан із термореле; 5 – триходовий клапан; 6 – сопло Лавалю;
7 – розподільна труба

Як тільки температура навколо починає знижуватись і наближається до заданих параметрів, подавання

припиняється, аби дати парі охолодити внутрішній простір і економно витратити холодоагент. Оскільки температура рідкого

азоту в балонах низька ($-190,09^{\circ}\text{C}$), теплоприпливи в балони неминучі, відповідно відбувається процес перетворення рідини в пару, як і підвищення тиску. Тому балони мають бути обладнані захисними клапанами 3. З підвищенням тиску пари вище встановленого на клапані, він відкривається і пара скидається в сопло Лавалю та поступає у вантаж, додатково передчасно охолоджуючи його.

Як тільки вантаж доставлено до пункту призначення, процес вивантаження і розбирання обладнання відбувається у зворотному порядку, а саме спочатку перекривають ручний клапан подавання азоту, далі кріюємності від'єднують від трубок, вивантажують із контейнера на дозаправлення і обслуговування, послідовно виймають вантаж із розбиранням системи трубопроводів. Як тільки процес вивантаження завершено, відбувається демонтаж термовкладиша, і контейнер готовий приймати наступний вантаж.

Визначення кількості азоту, необхідної для перевезення. Для розрахунку кількості рідкого азоту будемо виходити з того, що кріобалони мають певні розміри, аби поміститись у контейнер. Кріюємності виготовляють у вигляді циліндрів [20], тому і в нашому випадку також будемо використовувати циліндричну форму. Внутрішні розміри контейнера накладають обмеження за висотою циліндра. Також розміри установки не можуть бути більше за розмір палети, на якій буде встановлено балони. Отже, з урахуванням розміру різних типів палет [21-23] і задля зручності експлуатації і стандартизації виробництва пропонуємо використовувати стандартні циліндричні кріобалони діаметром 400 мм, крани подавання яких з'єднано між собою в єдину систему. На європейській і фінській палетах може бути вільно розміщено шість балонів, а на американській – дев'ять.

Перейдемо до розрахунку висоти та об'єму циліндричної кріюємності. Висота кріюциліндра

$$h = h_{\text{cont}} - h_{\text{tv}} - h_{\text{pal}} - h_{\text{d}}, \quad (1)$$

де h_{cont} – висота контейнера за внутрішніми розмірами [22];

h_{tv} – висота термовкладиша. У нашому дослідженні дорівнює 4 см;

h_{pal} – висота палети, за міжнародними стандартами, дорівнює 145 мм [23];

h_{d} – висота додаткового зазора, необхідного для встановлення клапанів і фіксуючих елементів, приймають 7 см.

Виконаємо необхідні розрахунки для європейської, фінської та американської палет. Приклад розрахунку покажемо на американській палеті для 20-футового контейнера:

$$h = 2,39 - 0,04 - 0,145 - 0,07 = 2,13 \text{ м},$$

$$V_1 = 3,14 * 0,2^2 * 2,13 = 0,267 \text{ м}^3,$$

$$V = 0,267 * 9 = 2,408 \text{ м}^3.$$

Оскільки ціна закупівлі рідкого азоту виставлена в одиницях маси (кг, т) [24], необхідно перевести об'ємну величину в масу:

$$m = \rho * V, \quad (2)$$

де ρ – питома густина рідкого азоту, що дорівнює 808 кг/м^3 [12].

$$m = 808 * 2,408 = 1945,46 \text{ кг}.$$

Отже, для охолодження 20-футового контейнера циліндричної форми, яку встановлено на американську палету, знадобиться до 1945,46 кг рідкого азоту. Аналогічні розрахунки проведемо для інших типів палет і контейнерів (табл. 1).

Таблиця 1

Результати розрахунку максимально допустимого об'єму та маси рідкого азоту у кріоємностях циліндричної форми для різних типів контейнерів

20-футовий	n, од	d, м	h_{cont} , м	h_{pal} , м	h_{tv} , м	h_d , м	h, м	V, м ³	m, кг
Євро і фінська	6	0,4	2,39	0,145	0,04	0,07	2,13	1,605	1296,98
Американська	9	0,4	2,39	0,145	0,04	0,07	2,13	2,408	1945,46
40-футовий									
Євро і фінська	6	0,4	2,39	0,145	0,04	0,07	2,13	1,605	1296,98
Американська	9	0,4	2,39	0,145	0,04	0,07	2,13	2,408	1945,46
40-футовий hc									
Євро	6	0,4	2,65	0,145	0,04	0,07	2,39	1,801	1455,29
Американська	9	0,4	2,65	0,145	0,04	0,07	2,39	2,702	2182,94

Розрахунок витрат рідкого азоту під час роботи кріогенної установки. Для визначення витрат холодоагенту в контейнері необхідне розуміння, яка кількість теплоти проникає всередину ІТО під час перевезення. Для цього розрахуємо деякі теплофізичні властивості. Для визначення витрат азоту під час перевезення і зберігання вантажу необхідно розрахувати теплоприпливи в контейнер, які залежать, по-перше, від температури зовнішнього повітря, по-друге, теплової ізоляції контейнера. Розрахунки виконано для декількох температур зовнішнього повітря

від +50 до +10 °С, що відповідає повному діапазону можливих умов перевезення і зберігання вантажів у контейнері: від тропічного клімату до помірного.

Для розрахунку теплоприпливів у контейнер розраховано коефіцієнт теплопередачі через огорожувальні поверхні контейнера. Прийнято, що контейнер перевозять на палубі судна, причепі контейнеровоза або залізничній платформі за температур навколишнього повітря $t_{outs.} = 50, 40, 30, 20, 10$ °С. На рис. 5 схематично зображено прийняту ізоляцію огорожувальних поверхонь контейнера.

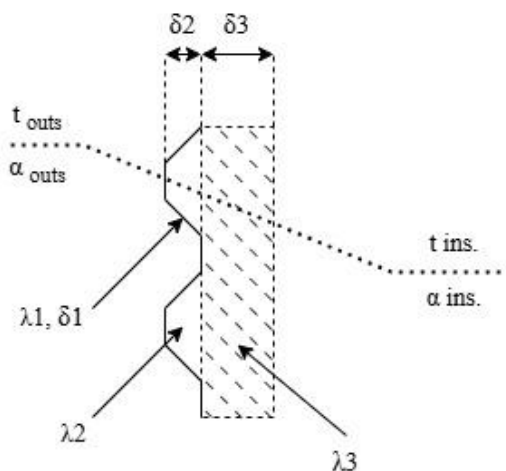


Рис. 5. Схематичне зображення проникнення теплового потоку

Теплоприпливи в контейнер визначали за формулою

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі огорожувальних поверхонь контейнера;

F – сумарна внутрішня площа огорожувальних поверхонь контейнера;

Δt – температурний напір (різниця температур зовнішнього повітря і повітря всередині контейнера з вантажем).

Коефіцієнт теплопередачі

$$k = \frac{1}{R_{\alpha_{outs}} + R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2} + R_{\lambda_3} + R_{\alpha_{ins}}}, \quad (4)$$

де $R_{\alpha_{outs}}$ – термічний опір зовнішнього середовища;

R_{λ_1} – термічний опір теплопровідності сталевго корпусу контейнера;

R_{λ_2} – термічний опір повітряного зазора між корпусом і термовкладишем;

R_{λ_3} – термічний опір термовкладиша;

$R_{\alpha_{ins}}$ – термічний опір тепловіддачі від поверхні термовкладиша до повітря вантажу (зазвичай коефіцієнт тепловіддачі в нерухомому повітрі приміщення не перевищує значення $\alpha_{ins} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $t_{ins} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Нижче наведемо приклад розрахунку коефіцієнта теплопередачі для переобладнаного 20-футового контейнера з вантажем замороженого м'яса яловичини. Контейнер розташовано на борту судна-

контейнеровоза, що рухається зі швидкістю 20 вузлів.

Розрахуємо складові коефіцієнта теплопередачі:

1) термічний опір за тепловіддачі від повітря до зовнішньої поверхні контейнера

$$R_{\alpha_{outs}} = \frac{1}{\alpha_{outs}}. \quad (5)$$

Для цього розраховано коефіцієнт тепловіддачі від зовнішнього повітря до стінок контейнера

$$\alpha_{air,outs} = \alpha_{outs} = \frac{Nu \cdot \lambda_{outs}}{l}, \quad (6)$$

де λ_{outs} – коефіцієнт теплопровідності повітря за температури навколишнього середовища [25],

$\lambda_{outs} = 2,77 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

Nu – критерій Нуссельта;

l – зовнішня довжина контейнера.

Для знаходження критерію Нуссельта визначено характер руху повітря відносно поверхні контейнера, для цього розраховано критерій Рейнольдса Re :

$$Re_l = \frac{w \cdot l}{\nu}, \quad (7)$$

де w – швидкість повітря відносно поверхні контейнера;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря за температури $50 \text{ }^\circ\text{C}$ [25],

$\nu = 1,76 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

$$Re_l = \frac{10,29 \cdot 6,06}{1,76 \cdot 10^{-5}} = 35,430 \cdot 10^5 > 5 \cdot 10^5.$$

Оскільки критерій Рейнольдса більше $5 \cdot 10^5$ – течія повітря турбулентна, і число Нуссельта розраховують за формулою

$$Nu = 0,032 \cdot Re_l^{0,8}. \quad (8)$$

$$N_u = 0,032 * (35,430 * 10^5)^{0,8} = 5554,57.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зовнішньої поверхні контейнера

$$\alpha_{outs} = \frac{5554,57 \cdot 2,77 \cdot 10^{-2}}{6,06} = 25,39 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

$$R_{\alpha_{outs.}} = \frac{1}{25,39} = 0,039 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

2) термічний опір теплопровідності сталевого корпусу контейнера

$$R_{\lambda_1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad (9)$$

де δ_1 – товщина стінок контейнера, $\delta_1 = 2 \text{ мм}$ [22];

λ_1 – коефіцієнт теплопровідності сталі [25], $\lambda_1 = 45 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

$$R_{\lambda_1} = \frac{0,002}{45} = 44,4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

3) термічний опір повітряного зазора між корпусом і термовкладишем

$$R_{\lambda_2} = \frac{\delta_2}{\lambda_2}, \quad (10)$$

де δ_2 – товщина зазора між поверхнею контейнера і термовкладишем (приймаємо $\delta_2 = 5 \text{ мм}$);

λ_2 – коефіцієнт теплопровідності повітря $\lambda_2 = 0,024 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [25];

$$R_{\lambda_2} = \frac{0,005}{0,024} = 0,208 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

4) термічний опір термовкладиша

$$R_{\lambda_3} = \frac{\delta_3}{\lambda_3}, \quad (11)$$

де δ_3 – товщина термовкладиша (приймаємо $\delta_3 = 35 \text{ мм}$);

λ_3 – коефіцієнт теплопровідності термовкладиша, $\lambda_3 = 0,035 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [26].

$$R_{\lambda_3} = \frac{0,035}{0,035} = 1 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

5) термічний опір тепловіддачі від поверхні термовкладиша до повітря вантажу

$$R_{\alpha_{ins}} = \frac{1}{\alpha_{ins}}, \quad (12)$$

$$R_{\alpha_{ins}} = \frac{1}{10} = 0,1 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

Тоді коефіцієнт теплопередачі через огорожувальні поверхні пропонованого контейнера

$$k = \frac{1}{0,039 + 44,4 \cdot 10^{-6} + 0,208 + 1 + 0,1} = 0,742 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Температурний напір між зовнішнім повітрям t_{outs} і повітрям всередині контейнера t_{ins}

$$\Delta t = t_{outs} - t_{ins}, \quad (13)$$

$$\Delta t = 50 - (-20) = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Внутрішні розміри 20-футового контейнера дорівнюють (LxBxH) = (5,75x2,35x2,39 м).

Загальна внутрішня поверхня такого контейнера дорівнює $F = 65,74 \text{ м}^2$, а внутрішній об'єм – $V_{\text{ins}} = 32,29 \text{ м}^3$. Питомий тепловий потік від зовнішнього повітря всередину такого контейнера дорівнює

$$Q = 0,742 \cdot 65,743 \cdot 70 = 3,415 \text{ кВт} = 3,415 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}.$$

Визначаємо термодинамічні властивості холодоагенту. Рідкий азот подають за допомогою ежектора, головним елементом якого є сопло Лавалю. Основним призначенням ежектора, побудованого за особливістю сопла Лавалю, є всмоктування рідини з однієї ємності і подавання її в другу. У нашому випадку повітря всмоктується і подається в одну і ту саму ємність – у контейнер, якщо в контейнері перевозять вантаж, що не потребує свіжого повітря. Якщо ж у контейнері перевозять вантаж, що «дихає», то в контейнер необхідно подавати свіже повітря в спеціально розрахованій кількості, потрібної для вантажу.

Атмосферний тиск повітря в контейнері дорівнює 0,101325 МПа. Відношення тиску рідини в мінімальному перерізі сопла Лавалю до тиску заторможеного потоку (перед соплом) називають критичним і для азоту, як двоатомного газу, дорівнює $\beta = 0,528$ [27].

Прийнявши в мінімальному перерізі сопла Лавалю $\beta = 0,528$ і тиск 0,1 МПа, розраховуємо тиск заторможеного потоку азоту (тиск рідкого азоту в балоні):

$$P_{\text{bal.}} = \frac{1}{\beta}, \quad (14)$$

$$P_{\text{bal.}} = \frac{1}{0,528} = 1,89 \text{ бар.}$$

Оскільки азот у балоні знаходиться в стані насиченої рідини, то за допомогою програмного забезпечення «Refprop» обчислюємо його термодинамічні властивості: температура $-190,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$; густина – 808 кг/м^3 ; ентальпія – $h_1 = -110,22 \text{ кДж/кг}$; ентропія – $2,900 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$. У звужувальній частині сопла Лавалю азот ізоентропно розширюється, тому його термодинамічні властивості в мінімальному перерізі сопла дорівнюють: температура $-195,91 \text{ }^{\circ}\text{C}$; ентальпія $-110,76 \text{ кДж/кг}$ (визначені за тиску 1 бар і ентропії $2,9800 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$). На виході із сопла суміш азоту і повітря, всмоктана соплом, повинна мати тиск дещо вище за атмосферний, щоб, здолавши гідравлічний опір розпорошувального колектора, вийти в простір контейнера. Температура суміші має бути дещо вище, ніж її температура на вході в простір контейнера, оскільки з дроселюванням через маленькі отвори розпорошувального колектора її температура знизиться. Тому прийнято тиск 1,03 бар, а температуру $-25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді ентальпія азоту в цьому стані дорівнює $h_2 = 257,19 \text{ кДж/кг}$. Отже, теплота, поглинена 1 кг азоту з його проходженням через сопло Лавалю,

$$\Delta q_{\text{N}_2} = h_2 - h_1, \quad (15)$$

$$\Delta q_{\text{N}_2} = 257,19 - (-110,76) = 367,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Навантажувальна щільність замороженого м'яса ($t_{ins} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$) становить $0,37...0,43\text{ т/м}^3$ [28]. Приймаємо $m_{cargo} = 0,4\text{ т/м}^3$.

Теплоємність вантажу при цьому становить [28]

$$C_{p, cargo} = 3,4\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Визначимо об'єм і масу вантажу в контейнері.

Об'єм, зайнятий балоном із рідким азотом

$$V_{bal.} = a * b * h, \quad (16)$$

де a – довжина палети;

b – ширина палети.

$$V_{bal.} = 1,2 * 1,2 * 2,13 = 3,07\text{ м}^3.$$

Об'єм, що займає вантаж, який перевозять,

$$V_{cargo} = V_{ins} - V_{bal.} \quad (17)$$

$$V_{cargo} = 32,29 - 3,07 = 29,23\text{ м}^3.$$

Тепер розрахуємо масу вантажу, яку будуть перевозити:

$$M_{cargo} = V_{cargo} * m_{cargo}, \quad (18)$$

$$M_{cargo} = 29,23 * 0,4 = 11,69\text{ т}.$$

Теплота, що поглинає вантаж під час його отеплення, на Δt_{ins} , $^{\circ}\text{C}$ (приймаємо рівним $\Delta t_{ins} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$),

$$\Delta Q_{cargo} = C_{p cargo} * M_{cargo} * \Delta t_{ins}, \quad (19)$$

$$\Delta Q_{cargo} = 3,4 * 11,69 * 1 = 39,749\text{ МДж}.$$

Час для отеплення вантажу на Δt_{ins} , $^{\circ}\text{C}$,

$$\tau = \frac{\Delta Q_{cargo}}{Q}, \quad (20)$$

$$\tau = \frac{\left(\frac{39,749 * 10^3}{3,415}\right)}{3600} = 3,23\text{ год}.$$

Витрати рідкого азоту криогенною установкою протягом циклу τ для забезпечення температури в допустимих межах

$$G_{N_2} = \frac{Q}{\Delta q_{N_2}}, \quad (21)$$

$$G_{N_2} = \frac{3,415}{367,75} = 0,0093\text{ } \frac{\text{кг}}{\text{с}} * 3600 = 33,43\text{ } \frac{\text{кг}}{\text{год}}.$$

Отже, витрати запропонованої установки, яка стоїть на опорі, що за розмірами відповідає американській палеті всередині 20-футового контейнера, який знаходиться на палубі судна контейнеровоза з вантажем замороженої яловичини за температури зберігання $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і температурі зовнішнього повітря $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, становить

33,43 кг/год з інтервалом подавання речовини кожні 3,23 год або 3 год 14 хв. При цьому коливання температури повітря всередині становить $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для того щоб зрозуміти, якими будуть добові витрати, визначимо кількість циклів подавання і добові витрати холодоагенту.

Кількість циклів подавання протягом доби

$$n = \frac{24}{\tau}, \quad (22)$$

$$n = \frac{24}{3,23} = 7,42 \text{ цикл.}$$

Добове подавання холодоагенту

$$G = G_{N_2} * n, \quad (23)$$

$$G = 33,43 * 7,42 = 248,08 \frac{\text{кг}}{\text{доба}}.$$

Максимальний час рейсу, за який буде витрачено весь запас холодоагенту,

$$T_{\text{voy}} = \frac{m}{G}, \quad (24)$$

де m – максимальна маса рідкого азоту, що зберігається в кріоємності;

G – добове подавання холодоагенту.

$$T_{\text{voy}} = \frac{1945,46}{248,08} = 7,84 \text{ діб} = 7 \text{ діб } 20 \text{ год.}$$

Аналогічно проведемо розрахунок для інших типів основ кріоємності і типів ІТО (табл. 2).

Таблиця 2

Результати розрахунку добових витрат рідкого азоту і максимально допустимого часу рейсу

20-футовий	a, м	b, м	L, м	B, м	H, м	Q, кДж/с	M _{cargo} , т	τ, год	G _{N₂} , кг/год	n, цикл.	G, кг/доб.	T _{voy} , діб
Євро	1,2	0,8	5,75	2,35	2,39	3,42	12,10	3,35	33,43	7,17	239,69	5,41
Фінська	1,2	1,0	5,75	2,35	2,39	3,42	11,89	3,29	33,43	7,29	243,82	5,32
Американська	1,2	1,2	5,75	2,35	2,39	3,42	11,69	3,23	33,43	7,42	248,08	7,84
40-футовий												
Євро	1,2	0,8	12,03	2,35	2,39	6,48	26,21	3,82	63,42	6,28	398,34	3,25
Фінська	1,2	1,0	12,03	2,35	2,39	6,48	26,00	3,79	63,42	6,33	401,47	3,23
Американська	1,2	1,2	12,03	2,35	2,39	6,48	25,79	3,76	63,42	6,38	404,65	4,81
40-футовий hc												
Євро	1,2	0,8	12,00	2,35	2,65	6,85	28,97	3,99	67,05	6,01	402,79	3,61
Фінська	1,2	1,0	12,00	2,35	2,65	6,85	28,75	3,96	67,05	6,06	406,00	3,58
Американська	1,2	1,2	12,00	2,35	2,65	6,85	28,52	3,93	67,05	6,10	409,27	5,33

На основі отриманих у табл. 1, 2 результатів можна дійти висновку, що використання запропонованої кріогенної установки у класичному 20-футовому контейнері є найбільш оптимальним щодо витрат холодоагенту відносно часу доставлення у випадку перевезення замороженого м'яса за температури -20 °С. При цьому рекомендовано за можливості використовувати саме американський

варіант палети-підставки розміром 1200x1200 мм, адже це дає максимальний ефект щодо витрат за добу часу, до того ж палета 1200x1200 мм має найбільш вдалу форму конструкції для розміщення на ній максимальної кількості кріоємностей.

Розрахунки виконано для екстремальних умов перевезення і зберігання мороженого м'яса. Навряд температура навколишнього середовища

буде цілодобово дорівнювати +50 °С, а тим більше протягом сумарного часу морського, залізничного і автомобільного перевезення, наприклад, мороженого м'яса. Тому дійсні терміни дієздатності розрахованого контейнера будуть тільки збільшуватися.

Основні чинники, що впливають на витрати азоту для перевезення, і відповідно обмеження в часі перевезення:

- температура навколишнього середовища;
- температура перевезення вантажу;
- теплофізичні характеристики вантажу;
- швидкість руху ІТО (транспортного засобу);
- розміри та матеріали стінок ІТО;
- кількість і якість ізоляції, яку буде змонтовано.

Виходячи з чинників, що впливають на витрати холодоагенту, рекомендовано для більш точних значень витрат здійснювати такі розрахунки для кожного відрізка рейсу

окремо, оскільки температура зовнішнього середовища під час доставлення може суттєво відрізнитися в пункті відправлення та призначення. Також слід урахувати швидкість переміщення ІТО (швидкість і тип транспортного засобу) у конкретний момент доставлення.

Висновки. 1. Доведено можливість використання зрідженого азоту як холодоагенту для перевезення вантажів, що потребують охолодження.

2. Розроблено в першому наближенні технологічні операції з переобладнання класичної ІТО у рефрижераторну шляхом встановлення в ІТО знімного термовкладиша з газифікатором, заповненим рідким азотом (іншим зрідженим холодоагентом).

3. Надано методику розрахунку витрат холодоагенту запропонованою установкою під час виконання рейсу в заданих кліматичних умовах.

Список використаної літератури

1. Ломейко О. П. Вакуумне охолодження – перспективний спосіб зберігання рослинної сировини у сільському господарстві. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2007. № 7. С. 116–122.
2. Алмати Э., Эрдели Л., Шарей Т. Быстрое замораживание пищевых продуктов. Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 106 с.
3. Рогов И. А., Куцакова В. Е., Филлипова В. И., Фролов С. В. Консервирование пищевых продуктов холодом. Москва: Колос, 1999. 168 с.
4. Подмазко О. С., Піщанська Н. О. Суднова холодильна техніка. Одеса, 2020. 59 с.
5. Флауменбаум Б. Л. Технология консервирования плодов, овощей, мяса и рыбы. Изд. 2-е, перер. и доп. Москва: Колос, 1993. 320 с.
6. Мазур А., Ковганко Р., Акулов В. Способи охолодження. *Технології переробки та упаковки*. 2002. № 4.
7. Масліков М. М. Холодильна технологія харчових продуктів: навч. посіб. Київ: НУХТ, 2007. 335 с.
8. Войтенко О. О., Братішко В. В. Особливості перевезення швидкопсувних вантажів. 2020. С. 78–79.
9. Холодильні установки рефрижераторного рухомого складу: навч. посіб. / І. Е. Мартинов, В. М. Іщенко, Н. С. Брайковська та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2013. 135 с.
10. Кириллова О. В. Теоретико-множественный подход к формализации логических отношений между понятиями «транспортная», «транспортно-технологическая» и «логистическая» системы. *Вісник ОНМУ*. 2014. № 1. С. 153–175.
11. Швецов Г. М., Ладин Н. В. Судовые холодильные установки. Москва: Транспорт, 1986. 232 с.

12. Жидкий азот. Кріогенсервіс. 2023. URL: <http://cryogen.com.ua/catalog/liquefied-gases/liquid-nitrogen/>.
13. Ступак Ю. О., Васильківський К. В. Використання азоту в пакувальних технологіях. *Новітні технології пакування : матеріали доповідей XV науково-практичної конференції молодих вчених*. Київ, 2016. С. 35-37. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/688b1721-555d-491e-a2e3-84b3c67272c4>.
14. Штанько О. А., Сімахіна Г. О. Перспективи отримання з побічних продуктів цукробурякового виробництва біологічно активних харчових добавок. *Наукові праці НУХТ*. 2004. №15. С. 55-58.
15. Охлаждение транспортного средства для перевозки пищевых продуктов с применением жидкого азота / Х. Педолски, Р. Гаврилов, В. Савельев та ін. 2001. № 1. С. 1–9.
16. Устройство для низкотемпературного охлаждения изотермического контейнера / Е. А. Амелин, В. М. Бойчук, А. Ф. Бондарь, Ю. Г. Леонов. SU1064091A1. 1983. URL: <https://patenton.ru/patent/SU1064091A1>.
17. Бондаренко В. И., Носик Л. Г. Рефрижератор. SU1204888A1. 1986. URL: <https://patenton.ru/patent/SU1204888A1>.
18. Сайт компанії Arivapak. URL: <https://arivapak.com/products/termovkladyshe-v-kontejner/>.
19. Термовкладыш THERMAL CONTAINER LINER: простое и доступное решение проблемы судоходной транспортировки вина. *Наної. Технології та Інновації*. 2017. URL: <https://techdrinks.info/termovkladysh-thermal-container-liner-prostoe-y-dostupnoe-reshenye-problemyi-sudokhodnoy-transportyrovky-vyna/>.
20. Сайт компанії «Cryo Inter Trading». 2024. URL: <https://cryo-tm.com.ua/uk/stacionarni-kriogenni-yemnosti-ta-rezervuari/548-stacionarnye-kriogennye-yomkosti-dlya-khraneniya.html>.
21. Сайт «Mathvox». URL: <https://mathvox.wiki/geometria/mnogougolniki/glava-5-pryamougolnik-i-ego-svoistva/esli-v-pryamougolnik-vpisana-okrujnost/>.
22. Розміри морських контейнерів. URL: <https://partnertrade.org/ua/dani-po-kontejneram/>.
23. Сайт EPAL Euro Pallet Association e.V. (EPAL). 2024. URL: <https://www.epal-pallets.org/eu-en/load-carriers/epal-euro-pallet>.
24. Рідкий азот: продаж, ціна. URL: <https://co2service.com.ua/ua/p1860712372-zhidkij-azot.html>.
25. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Москва: Энергия, 1973. 271 с.
26. Спінений поліетилен. Сайт компанії «Liderpak». 2024. URL: <https://www.liderpak.ua/product-category/packs/foamed-polyethylene/>.
27. Вассерман О. А., Слинько О. Г. Технічна термодинаміка і теплообмін: підручник. Одеса: Вид-во «Фенікс», 2019. 494 с.
28. Загоруйко В. О., Голюков О. А. Суднова холодильна техніка. Київ: Наукова думка, 2002. 575 с.

Слинько Олексій Григорович, кандидат технічних наук, професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет. E-mail: asg_37@ukr.net. ORCID iD 0000-0002-5310-4335.

Столянов Владислав Андрійович, аспірант кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень, Одеський національний морський університет. Тел.: +38(066)789-70-31. E-mail: wladislaw5009@gmail.com.

Slynko Oleksii Hryhorovych, Cand. Technical Sc., professor the Chair of Ship Power Plants and Technical Operation, Odesa National Maritime University. E-mail: asg_37@ukr.net. ORCID iD 0000-0002-5310-4335.
Stolianov Vladyslav Andriiovych, Post-Graduate Student the Chair of Fleet operation and shipping technology, Odesa National Maritime University. Tel.: +38(066)789-70-31. E-mail: wladislaw5009@gmail.com.

Статтю прийнято 18.02.2025 р.

УДК 656.07

РОЗРОБЛЕННЯ КЛЮЧОВИХ СКЛАДОВИХ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ РУХУ НА ПІДПРИЄМСТВІ СФЕРИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Асп. О. В. Погорілий

DEVELOPMENT OF KEY COMPONENTS OF A TRAFFIC SAFETY MANAGEMENT SYSTEM AT AN ENTERPRISE OF RAIL TRANSPORT AREAS

PhD student O. Pohorilyi

Анотація. Стаття присвячена розробленню основних компонентів системи управління безпекою руху (СУБР) для підприємств залізничного транспорту України. Особливу увагу приділено детальному аналізу методики формування класифікатора ризиків, який є важливим інструментом у системі управління безпекою. Методика базована на систематизації причин та аналізі ризиків транспортних подій, характерних для залізничного транспорту. Автор подав покрокову схему розроблення класифікатора, яка включає визначення об'єктів і суб'єктів, схильних до ризиків, місць виникнення небезпечних ситуацій, видів ризиків і їхніх наслідків.

Важливим внеском роботи є пропозиція адаптації цього класифікатора до специфіки діяльності кожного конкретного підприємства залізничної сфери. У статті також розглянуто питання впровадження ризик-менеджменту, розроблення політики безпеки, визначення ролей вищого керівництва та персоналу, що є основою для ефективної реалізації СУБР. Описано процедури внутрішнього аудиту і важливість створення культури безпеки на підприємствах. Розроблена методика забезпечує підприємства необхідними інструментами для впровадження систем управління безпекою, підвищуючи загальний рівень безпеки руху та мінімізуючи ризики.

Окрему увагу приділено реалізації класифікатора ризиків, який ураховує реальні умови функціонування залізничних підприємств. Наведені в статті приклади демонструють, як класифікатор може бути інтегрований у систему управління конкретного підприємства з урахуванням наявних ресурсів, технічних та організаційних особливостей. Упровадження такого підходу дає змогу підвищити відповідність нормативним документам і міжнародним стандартам у сфері залізничного транспорту. Результати дослідження можуть бути корисними для спеціалістів із управління ризиками, а також розробників нормативної бази з безпеки на транспорті.

Отже, запропоновані в статті рекомендації забезпечують практичну та наукову основу для подальшого вдосконалення системи управління безпекою руху на залізничному транспорті України.

Ключові слова: управління безпекою руху, залізничний транспорт, положення про систему управління безпекою руху, управління ризиками, класифікатор ризиків, підприємство залізничного транспорту.

Abstract: The development of essential elements of the traffic safety management system for Ukrainian railway transport companies is the focus of this essay. A thorough examination of the process for developing a technological risk classifier — a crucial instrument in the safety management system — receives special attention. Systematizing the causes and analyzing the risks of transport incidents that are specific to railway transport forms the basis of the technique. The authors

provided a detailed plan for creating a classifier that covers defining risky things and topics, locations where hazardous situations arise, and the many kinds of risks and their effects.

The suggestion to modify this classifier to fit the particulars of any railway enterprise's operations is a significant addition of the work. As the foundation for the successful implementation of the traffic safety management system, the article also examines the problem of putting risk management into practice, creating a safety policy, and outlining the responsibilities of top management and staff. Procedures for internal audits and the significance of establishing a safety culture in businesses are explained. The created technique gives businesses the tools they need to build safety management systems, lowering risks and raising overall traffic safety.

The article's examples show how the classifier can be integrated into a specific enterprise's management system, taking into account organizational, technical, and resource characteristics. The implementation of such an approach allows for increased compliance with regulatory documents and international standards in the field of railway transport. The study's findings may be helpful to risk management specialists as well as those who are developing the regulatory framework for transport safety. Special attention is paid to the implementation of a risk classifier that takes into account the actual conditions of the functioning of railway enterprises.

Therefore, the article's suggestions offer a realistic and empirical foundation for future enhancements to Ukraine's railway traffic safety management system.

Keywords: traffic safety management, railway transport, regulations on the traffic safety management system, risk management, risk classifier, railway transport company.

Вступ. На початку 2021 року в Україні було ухвалено нове Положення про систему управління безпекою руху на залізничному транспорті (далі – Положення про СУБР) [1]. Це перший нормативний документ європейського стилю на залізничному транспорті України. Дія його розповсюджується не тільки на залізничний транспорт, але й більше 1500 підприємств сфери залізничного транспорту, які у своїй діяльності використовують або мають на балансі залізничний рухомий склад чи залізничну інфраструктуру. А це декілька тисяч підприємств України. Упровадження Положення про СУБР в Україні дещо загальмовано через повномасштабну війну, але процес продовжується.

З упровадженням СУБР на підприємстві, на якому не існувало служби з безпеки руху, виникає ряд проблем організаційного, документального, концептуального порядку – це розроблення класифікатора транспортних подій, положення про розслідування транспортних подій, класифікатора ризиків, фіксації порушень і ведення документації, ризик-менеджменту тощо.

Отже, методичне забезпечення правильного розроблення Положення про СУБР стає актуальною та практично значущою проблемою, ураховуючи значущість безпеки на державному та громадському рівнях.

У Положенні про СУБР є обов'язкові поняття і розділи, які мають декілька значень у практиці організації та технології підприємств. Тому автор вважає за необхідне надати своє бачення та коментарі основних понять, що буде корисним для розроблення СУБР конкретних підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Положення [1] дає всі необхідні складові СУБР, але у вигляді вимог і загального опису. Реалізовувати це Положення майже неможливо без цілої низки додаткових нормативних документів, які треба адаптувати до особливостей діяльності конкретного підприємства.

Теорія безпеки Д. Петерсена [2] є базовою для фахівців менеджменту і безпеки на підприємстві. Вона дає основні принципи розроблення та управління безпекою на підприємстві. Але ця робота не

містить деяких основних понять Положення про СУБР: управління ризиками, розслідування транспортних подій. Тому ця робота є суттєвим доповненням до СУБР на підприємстві залізничної сфери.

У роботі [3] зазначено про необхідність розроблення системи управління ризиками. Подано апостеріорне та апріорне значення ризику, які дають змогу охарактеризувати реальний стан безпеки залізничного руху за досліджуваний період і прогнозовану безпеку залізничного руху. Однак запропонована система ризиків має узагальнюючий характер, що ускладнює визначення причин порушення безпеки руху.

Автори робіт [4, 5] зазначають про необхідність утримання ризиків не вище встановленого рівня. Такий підхід сприяє ухваленню рішень, що враховують невизначеність умов, можливість настання певних подій чи обставин у майбутньому, а також їхній вплив на досягнення поставлених цілей організації у сфері функціональної безпеки об'єктів інфраструктури та рухомого складу. Проте в роботах не розглянуто питання збору вхідної інформації для забезпечення ефективної системи ризик-менеджменту.

У роботі [6] зазначено, що завдяки аналізу ризику система управління підприємством здатна забезпечити безпечну та ефективну організацію діяльності. Проте в роботі відсутній конкретний опис інформації, використовуваної для визначення ризиків.

У статті [7] досить повно викладено відомості про управління безпекою руху на залізничному підприємстві на основі управління ризиками. Уведено поняття базової причини або передумови, що дає змогу ефективного управління безпекою руху. Проте ця робота присвячена системам сигналізації, експлуатованим АТ «УЗ» і не використовуваним підприємством за межами АТ «УЗ».

Автори роботи [11] зазначають, що управління ризиками в залізничній галузі

має фрагментарний та епізодичний характер, що обумовлює вагомість і потребу формування системи ризик-менеджменту. Це дасть змогу удосконалити систему корпоративного управління та забезпечити ухвалення більш виважених управлінських рішень. Однак у роботі подано лише теоретичну частину щодо управління ризиками на залізничному транспорті.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є розроблення основних складових системи управління безпекою руху на підприємстві сфери залізничного транспорту. Завдання статті: 1) пояснити особливості застосування деяких основних понять Положення про СУБР, які мають неоднозначне тлумачення; 2) розробити послідовність формування та приклад класифікатора ризиків для підприємства залізничного транспорту.

Основна частина дослідження

1. Пояснення особливості застосування деяких основних понять Положення про СУБР, які мають неоднозначне тлумачення

У цьому розділі використано деякі думки Д. Петерсена – автора одного з концептуальних підходів з управління безпекою [2].

Визначення політики. Політику не лише в термінології, а й на практиці часто плутають з правилами, усталеною практикою, процедурами та прецедентами. Однак політика має певні унікальні значення. Це поняття в Положенні про СУБР передбачає можливість розсудливості, ініціативи та судження для ухвалення рішення про те, що слід робити в конкретних ситуаціях.

Дуже часто намагаються відокремити політику від процедур і правил. Можливо, не обов'язково, щоб політика була чистою. Найважливішим є, мабуть, те, що в політиці має бути показана роль керівництва. Політику можна визначити як певний курс, якого дотримуються. Коли вище керівництво підприємства оголошує такий курс, то тим самим підтверджує спільну

мету і добровільні співпрацю кожного співробітника підприємства. Дотримання такого курсу породжує синергетичний ефект фокусування на конкретних цілях усіх ланок, у яких задіяний персонал підприємства.

Політика має:

- підтверджувати довгострокові цілі;
- зобов'язати керівництво ухвалювати рішення для досягнення мети;
- зазначати обсяги та сутність роботи з забезпечення;
- вказати джерело фінансування та мінімальний обсяг фінансування СУБР на підприємстві.

Персонал підприємства повинен усвідомлювати, що безпека руху – це його пряма відповідальність. Персонал буде впевнений у цьому лише тоді, коли безпека однозначно покладена на нього керівництвом, оформлена та описана у внутрішніх інструкціях, процедурах, наказах тощо.

Ще один принцип Петерсена полягає в тому, що керівництво має інтегрувати зусилля з безпеки руху, встановлюючи цілі, плануючи і контролюючи кількісні та якісні показники їх досягнення. Політика безпеки руху – це путівник для впровадження сталої системи безпеки руху, якого слід дотримуватися з розробленням усіх складових СУБР на підприємстві. Важливо, щоб політика безпеки руху була письмово оформлена, щоб не було плутанини щодо керівництва та розподілу відповідальності.

Політика безпеки руху більше, ніж будь-яка політика, вимагає, щоб кожна особа на підприємстві вживала певних дій – від вищого керівництва до рядового працівника. Безпечне функціонування в межах підприємства вимагає ухвалення рішення кожною особою, яка входить до системи управління безпекою.

Викладення політики може розрізнятися залежно від підприємства. Це нормально, бо все, що найкраще відповідає специфіці діяльності підприємства, має бути включено. *Жодна політика не є правильною чи неправильною. Вона є правильною саме*

для цього підприємства. У політиці безпеки слід урахувати такі питання:

- наміри вищого керівництва;
- обсяг діяльності, що забезпечить необхідний рівень безпеки руху;
- обов'язки;
- підзвітність;
- допомога персоналу з боку служби безпеки руху;
- громадські структури з безпеки руху;
- стандарти.

Ці питання допоможуть скласти політику безпеки. Важливо, щоб вище керівництво відповідало за політику безпеки руху, оскільки безпека впливає на всі структурні підрозділи підприємства, а не лише на виробництво.

Велике місце в реалізації політики СУБР має *культура безпеки руху* на підприємстві, яка має бути в центрі уваги вищого керівництва та служби безпеки руху, постійно оновлюватися та розвиватися. Поняття культури безпеки руху є дуже змістовним, тому автор не мав наміру розкривати сутність її. Політика безпеки руху управляє не виконанням безпеки руху, а підзвітністю. Підзвітність – ключ до побудови культури. Лише тоді, коли працівники бачать керівництво, яке щодня виконує своє завдання з безпеки руху, вони вважають, що управління є надійним, а керівництво справді мало на увазі це, коли підписувало політику безпеки руху.

Ролі вищого керівництва та персоналу. Наявність політики безпеки руху рідко досягає чогось, якщо вона не супроводжена зусиллями відповідальних осіб за її реалізацію, оновлення та підтримку, особливо вищого керівництва. Необхідно, щоб вище керівництво СУБР:

- мало чітке визначення ролей і заходів для дотримання відповідальності за безпеку руху;
- було навченим і добре розуміло складові СУБР;
- регулярно контролювало визначені завдання, а не тільки для розслідування транспортної події;

– планувало винагороду від завершення завдання в системі оцінювання СУБР підприємства.

Це справедливо на кожному структурному рівні підприємства.

Отже, лідерство має вирішальне значення для результатів безпеки руху, оскільки воно формує культуру. Хороший керівник чітко дає зрозуміти, чого він хоче для результатів і що саме буде зроблено для досягнення результатів. Лідерство, безсумнівно, важливіше за політику, оскільки лідер своїми діями та рішеннями дає підприємству чіткі повідомлення, що потрібно, а що ні. Дії, система управління підприємством, заходи та винагороди керівництва чітко визначають, чи буде досягнута безпека руху на підприємстві.

Існує загальне уявлення про переважання на всіх рівнях підприємства. Переважання є причиною більшості нещасних випадків, фізичної та психологічної втоми, стресу.

Робота спеціаліста з безпеки руху та персоналу є самовизначеною. Обов'язки будуть розрізнятися залежно від розміру підприємства, масштабу операцій із залізничним рухомим складом та інфраструктурою, самих працівників, проблем підприємства.

Дуже багато залежить від навчання та відповідно кваліфікації персоналу з питань забезпечення руху.

Особлива роль належить службі безпеки руху підприємства. Основними напрямками служби безпеки руху є такі:

- передбачити, виявити і оцінити небезпечні місця та передумови транспортних подій;
- розробити схеми, методи, процедури і програми управління ризиками;
- впроваджувати, контролювати і консультувати людей щодо програм управління безпекою руху;
- вимірювати, перевіряти і оцінювати ефективність СУБР.

Внутрішній аудит. У широкому сенсі аудит – це об'єктивний аналіз для

вдосконалення організації підприємства, заснований на спостереженнях, перевірках, опитуванні та вивченні відповідних документів. Для аудиту систем менеджменту авторитетним є стандарт ISO 19011. У розділі 3.1 визначено аудит як «систематичний, незалежний і документований процес для отримання об'єктивних доказів та їх об'єктивної оцінки для визначення ступеня виконання критеріїв аудиту» [9].

Внутрішній аудит на підприємстві має точно вимірювати ефективність СУБР. Процес побудови аудиту складається з визначення:

- елементів системи безпеки руху;
- їхньої відносної важливості;
- питань, щоб знати обстановку на підприємстві.

Якщо недостатньо уваги приділено якості виконання аудиту, то його результат – «паперова» програма. Пропоновано використовувати такі напрями аудиту:

- співбесіди зі співробітниками на всіх рівнях;
- огляд робочих місць;
- оцінювання розслідування транспортної події, звітність, аналіз;
- оцінювання виконання заходів після попередніх аудитів, перевірок або виявлених небезпек;
- аналіз навчального процесу питанням безпеки руху;
- оцінювання процесів інформування з питань безпеки руху.

Після цього само підприємство визначає критерії для оцінювання СУБР. Наприклад, ініціює служба безпеки руху, розглядає Комітет або рада з безпеки підприємства, затверджує керівник із безпеки руху підприємства.

Аудити мають негативне ставлення персоналу: порушують автономію праці, гальмують творчість, змушують діяти одноманітно, зазвичай базовані на думці однієї людини, суб'єктивні.

Проте аудити є і корисними:

- вони привертають увагу;
- форсують продуктивність.

Як можна отримати переваги без недоліків? Є один спосіб зробити це: перевірка відповідно до узгоджених критеріїв замість стандартів, продиктованих підприємством (або сторонніми особами). Це забезпечує повну гнучкість програм.

2. Розроблення послідовності формування та прикладу класифікатора ризиків для підприємства залізничного транспорту

У цьому розділі надано методичні рекомендації з формування класифікатора

ризиків і ризик-менеджменту [10-12] відповідно до Положення [1], яке є основним моментом управління безпекою руху. Пропоновано таку схему формування (рис. 1).

У табл. 1-3 надано переліки елементів кожного блока діаграми Перта. У табл. 1 подано елементи схильних до ризику об'єктів і суб'єктів (блок 1) і види робіт, за яких виникають небезпека і ризики для безпеки руху (блок 2).

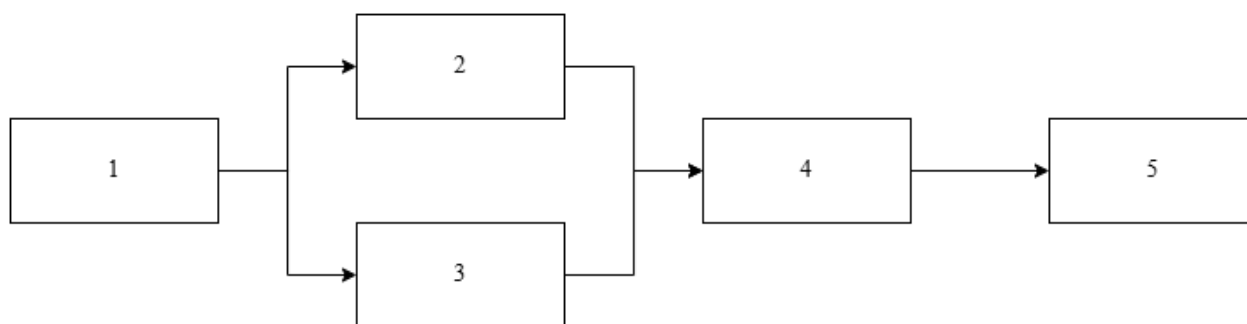


Рис. 1. Діаграма Перта послідовності розроблення класифікатора ризиків на підприємстві: 1 – схильні до ризику об'єкти і суб'єкти; 2 – види робіт, за яких виникають небезпека і ризики для безпеки руху; 3 – місця розташування небезпек і ризиків; 4 – орієнтовний перелік ризиків у перевізному процесі; 5 – перелік небезпечних ситуацій і наслідків реалізації ризиків

Таблиця 1

Переліки елементів блоків 1 і 2 діаграми Перта послідовності визначення класифікатора ризиків

1 – перелік схильних до ризику об'єктів і суб'єктів	2 – перелік видів робіт, за яких виникають небезпека і ризики для безпеки руху
1.1 поїзд; 1.2 залізничний рухомий склад; 1.3 залізнична інфраструктура; 1.4 штучні споруди; 1.5 вантаж; 1.6 автомобільний транспорт і автотракторна техніка; 1.7 пасажери; 1.8 персонал; 1.9 підрядники; 1.10 сторонні особи; 1.11 тварини; 1.12 інші	2.1 поїзна робота; 2.2 маневрова робота; 2.3 господарча робота; 2.4 обслуговування; 2.5 інші

Таблиця 2

Переліки елементів блоків 3 і 5 діаграми Порта послідовності визначення класифікатора ризиків

3 – місця розташування небезпек і ризиків	5 – перелік небезпечних ситуацій і наслідків реалізації ризиків
3.1 головні колії; 3.2 колії приймання й відправлення пасажирських поїздів; 3.3 під'їзні колії; 3.4 приймально-відправні колії для безупинного пропускання поїздів; 3.5 залізничні переїзди; 3.6 пішохідні переходи; 3.7 штучні споруди; 3.8 прилеглі території	5.1 травмування/загибель сторонніх осіб; 5.2 травмування/загибель пасажирів; 5.3 травмування/загибель персоналу; 5.4 затримка пасажирських поїздів ≥ 1 год; 5.5 затримка вантажних поїздів ≥ 2 год; 5.6 сходження рухомого складу; 5.7 пожежа на рухомому складі; 5.8 саморозчеплення/розрив автозчепу у вантажному або пасажирському поїзді; 5.9 падіння деталей рухомого складу на колію; 5.10 проїзд заборонного сигналу; 5.11 зіткнення рухомого складу; 5.12 відмова систем сигналізації/електропостачання ≥ 8 год; 5.13 розріз стрілки (рухомого осердя хрестовини); 5.14 неогородження сигналами небезпечного місця; 5.15 відмова пристроїв на залізничних переїздах ≥ 4 год; 5.16 невидача попереджень на поїзди; 5.17 несвоєчасне закінчення робіт у вікно; 5.18 вихід вантажу за встановлені габарити; 5.19 приймання/відправлення поїзда за неправильно підготовленим або непідготовленим маршрутом; 5.20 вихід рухомого складу за граничний стовпчик; 5.21 вихід рухомого складу на маршрут приймання/відправлення поїзда або на перегін; 5.22 відправлення поїзда з перекритими кінцевими кранами; 5.23 злам елементів кузова/візка вагона; 5.24 поява дозвільного/більш дозвільного показання сигналу

Таблиця 3

Переліки елементів блоків 4 діаграми Порта послідовності визначення класифікатора ризиків

4 – орієнтовний перелік ризиків перевізного процесу	
1	2
<i>4.1. Середовище та сторонні особи:</i> 4.1.1 вплив навколишнього середовища на діяльність господарства; 4.1.2 несанкціоновані втручання в колійному господарстві; 4.1.3 несанкціоновані втручання в господарстві перевезень;	<i>4.5. Тепловоз:</i> 4.5.1 витікання води з водяної системи дизеля; 4.5.2 технічні несправності; 4.5.3 неписування візка в криву ділянку; 4.5.4 несправність паливно-підкачувального насоса паливної апаратури дизеля;

Продовження табл. 3

1	2
4.1.4 несанкціоновані втручання в пасажирському господарстві; 4.1.5 несанкціоновані втручання в локомотивному господарстві; 4.1.6 несанкціоновані втручання в господарствах сигналізації та енергетики. <i>4.2. Персонал:</i> 4.2.1 порушення чи неправильні дії локомотивних бригад; 4.2.2 несвоєчасні дії локомотивної бригади з усунення відмов устаткування; 4.2.3 відволікання локомотивної бригади від нагляду за сигналами; 4.2.5 порушення локомотивною бригадою порядку ведення поїзда; 4.2.6 неперевірка локомотивною бригадою правильності зчеплення з вагонами; 4.2.7 відсутність контролю локомотивної бригади за роботою устаткування; 4.2.8 неправильне управління гальмами локомотивною бригадою; 4.2.9 помилки причетних працівників локомотивного господарства; 4.2.10 неправильно приготовлений маневровий маршрут працівниками господарства перевезень; 4.2.11 неузгоджені або неправильні дії працівників господарства перевезень для виконання маневрової роботи; 4.2.12 помилки працівників колійного господарства; 4.2.13 неправильне гальмування відчепів з розформуванням поїздів; 4.2.14 незадовільна організація колійних робіт у «вікно»; 4.2.15 неправильні дії працівників вагонного господарства на території депо. <i>4.3. Вантажний вагон:</i> 4.3.1 задири на торцях роликів «ялинка» підшипників роликової букси буксового вузла; 4.3.2 завал біля «мертвої» точки важелів гальмової передачі гальмового обладнання; 4.3.3 нагрівання роликової букси; 4.3.4 несправності гальмового обладнання; 4.3.5 прокручування внутрішнього кільця підшипника буксового вузла;	4.5.6 несправність регулятора обертів дизеля; 4.5.7 несправності циліндрового комплекту дизеля; 4.5.8 несправності систем забезпечення дизеля; 4.5.9 тріщина циліндра циліндрового комплекту дизеля; 4.5.10 несправності акумуляторної батареї електричного обладнання; 4.5.11 несправності дизеля; 4.5.12 несправності тягового електродвигуна; 4.5.13 несправності турбокомпресора дизеля; 4.5.14 несправності паливної апаратури дизеля; 4.5.15 несправності водяної системи дизеля; 4.5.16 тріщина в трубопроводах водяної системи дизеля; 4.5.17 пошкодження моторно-якірного підшипника тягового електродвигуна; 4.5.18 коротке замикання в обмотці якоря тягового електродвигуна; 4.5.19 несправності шатунно-поршневої групи дизеля; 4.5.20 несправності електричного обладнання; 4.5.21 несправність водяного насоса водяної системи дизеля; 4.5.22 пошкодження, коротке замикання з'єднувальних кабелів тягового електродвигуна; 4.5.23 несправності головного генератора; 4.5.24 несправності масляної системи дизеля; 4.5.25 несправності буксового вузла механічної (екіпажної) частини; 4.5.26 несправності механічної (екіпажної) частини; 4.5.27 коротке замикання в низьковольтних колах електричного обладнання.

Продовження табл. 3

1	2
4.3.6 обрив підвідних трубок гальмівної повітряної магістралі гальмового обладнання; 4.3.7 ослаблення нарізі гайки М-110 торцевого кріплення роликової букси буксового вузла ходової частини; 4.3.8 несправності повітророзподільника гальмового обладнання; 4.3.9 несправності підшипників роликової букси буксового вузла; 4.3.10 несправності візка ходової частини; 4.3.11 саморозчеплення автозчепу тягово-зчіпного приладу; 4.3.12 несправності корпусу роликової букси буксового вузла; 4.3.13 несправності рами візка ходової частини. <i>4.4. Електровоз:</i> 4.4.1 коротке замикання в низьковольтних ланцюгах електричного обладнання; 4.4.2 несправності тягового електродвигуна; 4.4.3 пошкодження моторно-якірного підшипника тягового електродвигуна; 4.4.4 несправності гальмового та пневматичного обладнання; 4.4.5 несправності електричного обладнання; 4.4.6 коротке замикання в силових колах електричного обладнання; 4.4.7 несправності струмоприймача дахового обладнання; 4.4.8 тріщина внутрішнього кільця підшипника буксового вузла; 4.4.9 пошкодження карданного вала, муфти редуктора колісної пари; 4.4.10 несправності тягового силового трансформатора; 4.4.11 несправності електроапаратури кіл управління електричного обладнання; 4.4.12 злам вала тягового електродвигуна; 4.4.13 інші несправності електричного обладнання; 4.4.14 несправності редуктора колісної пари механічної (екіпажної) частини; 4.4.15 несправності буксового вузла механічної (екіпажної) частини; 4.4.16 пробій ізоляторів тягового електродвигуна; 4.4.17 пошкодження, коротке замикання з'єднувальних кабелів тягового електродвигуна;	<i>4.6. Електро- та дизель-поїзд:</i> 4.6.1 злам зуба малої шестерні тягового редуктора колісної пари; 4.6.2 несправності тягового електродвигуна; 4.6.3 несправності коробки змінних передач механічної (екіпажної) частини дизель-поїзда; 4.6.4 коротке замикання в силових колах електричного обладнання; 4.6.5 пошкодження моторно-якірного підшипника тягового електродвигуна; 4.6.6 злам зуба зубчатого колеса тягового редуктора колісної пари; 4.6.7 несправність компресора гальмового та пневматичного обладнання; 4.6.8 несправності силових кіл електричного обладнання; 4.6.9 несправності допоміжних машин електричного обладнання. <i>4.7. Інфраструктура:</i> 4.7.1 пошкодження несучого троса контактної мережі; 4.7.2 куцова непридатність шпал, брусів колії; 4.7.3 злам затискачів і кріплень контактної мережі з пошкодженням струмоприймача; 4.7.4 розрегулювання повітряної стрілки контактної мережі з пошкодженням струмоприймача; 4.7.5 обрив контактного проводу контактної мережі; 4.7.6 обрив контактного проводу контактної мережі з пошкодженням струмоприймача; 4.7.7 злами рейки колії, виколування або викришування в її головці; 4.7.8 пошкодження несучого троса контактної мережі з пошкодженням струмоприймача; 4.7.9 відхилення від норм утримання рейкової колії в плані; 4.7.10 відступ від норм утримання за шаблоном (розширення колії) рейкової колії стрілочного переводу;

Продовження табл. 3

1	2
4.4.18 пошкодження реакторів згладжувальних (перехідних) електричного обладнання; 4.4.19 несправність привода ЕКГ, серводвигуна контролера силового (ЕКГ) електричного обладнання; 4.4.20 несправності двигуна вентилятора електричного обладнання; 4.4.21 несправності силових кіл електричного обладнання; 4.4.22 коротке, міжвиткове замикання обмотки тягового силового трансформатора	4.7.11 непридатність перевідних брусів рейкової колії стрілочного переводу

У табл. 1-3 терміном «господарство» (колійне, сигналізації, локомотивне і т. д.) названо фахівців підприємства, які забезпечують відповідні напрями безпеки руху (колія, системи сигналізації, обслуговування локомотива тощо). Але це не обмежує підприємства в покладенні на працівників одночасно декількох обов'язків у різних напрямках.

На рис. 2 подана розроблена автором структурна схема взаємодії характеристики складових перевізного процесу з метою ідентифікації небезпечних факторів і ризиків безпеки руху. Ця схема буде дуже корисною для самостійного розроблення підприємством ризиків перевізного процесу щодо безпеки руху. Кожний блок структурної схеми позначений скорочено відповідно до табл. 1-3.

Розглянута структурна схема взаємодії характеристик складових перевізного процесу демонструє взаємозв'язок між основними елементами, що впливають на безпеку руху. За нею можна чітко визначити джерела ризиків, місця їх виникнення та можливі наслідки, що сприяє ефективному впровадженню заходів із мінімізації небезпек. Важливо, що така схема дає змогу підприємствам адаптувати управлінські рішення для власних умов, а також здійснювати моніторинг і аналіз ефективності впроваджених заходів.

Впровадження подібного підходу дає змогу покращити відповідність нормативним вимогам і міжнародним стандартам.

Висновки. 1. На основі аналізу діяльності підприємств сфери залізничного транспорту визначено п'ять основних напрямів розроблення та впровадження СУБР, які є найбільш невизначеними в умовах відсутності досвіду експлуатації таких систем, – це політика безпеки, роль вищого керівництва та персоналу, внутрішній аудит, культура безпеки та управління ризиками. Впровадження цих елементів сприятиме підвищенню загального рівня безпеки на підприємствах.

2. Запропонований класифікатор ризиків відрізняється від наявних тим, що враховує специфічні умови функціонування підприємств залізничного транспорту, не обмежуючись тільки масштабними структурами, такими як АТ «УЗ». За ним можна більш точно ідентифікувати ризики, характерні для конкретного підприємства, що значно підвищує ефективність заходів щодо управління безпекою.

3. Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленої методики для підприємств залізничного транспорту. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на удосконалення механізмів оцінювання

ефективності заходів ризик-менеджменту, інтеграцію системи управління безпекою з автоматизованими платформами

моніторингу, розроблення адаптивних алгоритмів реагування на небезпечні ситуації.

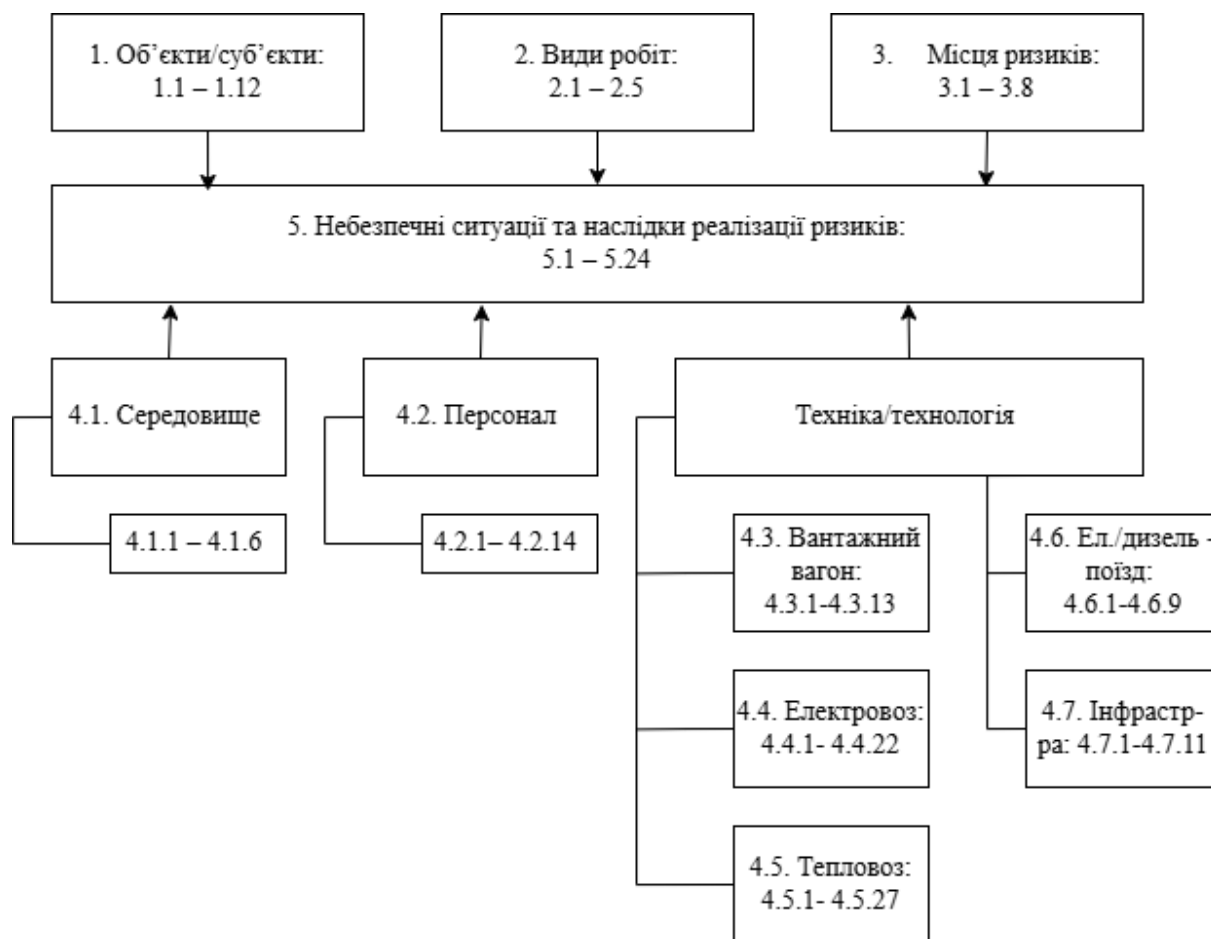


Рис. 2. Структурна схема взаємодії характеристики складових перевізного процесу з метою ідентифікації небезпечних факторів і ризиків безпеки руху

Список використаних джерел

1. Про затвердження Положення про систему управління безпекою руху на залізничному транспорті: Наказ Міністерства інфраструктури України від 24 грудня 2020 р. № 842. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0351-21#Text>.
2. Petersen D. Techniques of Safety Management: A Systems Approach. San Diego: Amer. Society of Safety Engineers, 2003. 364 p.
3. Bulakh M., Okorokov A. & Baranovskyi D. (2021). Risk System and Railway Safety. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 666(4). 042074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042074>.
4. Read G. J. M., Naweed A. & Salmon P. M. (2019). Complexity on the rails: A systems-based approach to understanding safety management in rail transport. *Reliability Engineering & System Safety*. 188. 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.038>

5. Em El-Koursi, Subhabrata Mitra, Bearfield G. (2018). Harmonising Safety Management Systems in the European Railway Sector Safety Science Monitor. I P S O Australia. Vol 11 (Issue 2). 14.
 6. Kalem A., Lindov O., Šimić E. (2021). Safety Culture in the Function of Optimization of Railway Safety Management System. In: Karabegović I. (eds) New Technologies, Development and Application IV. NT 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol 233. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75275-0_77.
 7. Samsonkin V., Sotnyk V., Yurchenko O., Zmii S., Myronenko V., Soloviova O. (2022). Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6/3(120). P. 32-43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268715>.
 8. Panchenko N. (2018). The formation of the system of risk-management on railway transport of Ukraine. *Agrosvit*. (22). 34. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2018.22.34>.
 9. Що таке аудит. URL: <https://www.dqsglobal.com/uk-ua/navchajtesya/centr-znan%27-dqs/scho-potribno-znati-pro-audit>.
 10. ISO 31000:2009. Ризик Менеджмент. Принципи і керівництво.
 11. ДСТУ ISO Guide 73-2013. Керування ризиком. Словник термінів.
 12. ДСТУ IEC/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання.
-

Погорілий Олександр Вікторович, аспірант кафедри технологій транспорту та управління процесами перевезень, Державний університет інфраструктури та перевезень. ORCID iD: 0000-0003-4824-2191. Тел.: +38 (095) 283-12-85. E-mail: avpmailx@gmail.com.

Pohoriliy Oltksandr, PhD student, Department of transport technologies and transportation process management, State University of Infrastructure and Technologies. ORCID iD: 0000-0003-4824-2191. Tel.: +38 (095) 283-12-85. E-mail: avpmailx@gmail.com.

Статтю прийнято 18.02.2025 р.

УДК 629.5.064.6:662.767

РОЗРОБЛЕННЯ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА В СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Канд. техн. наук М. П. Булгаков, д-р техн. наук О. М. Мельник,
асп. Д. А. Волошин

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR THE USE OF HYDROGEN FUEL IN SHIP POWER PLANTS

PhD (Tech.) M. Bulgakov, Dr. Sc. (Tech.) O. Melnyk,
postgraduate student D. Voloshin

Анотація. Використання водневого палива набуває все більшого значення як напрям розвитку екологічно безпечних технологій у сфері морських перевезень. Завдяки своїй високій енергоефективності та здатності суттєво знижувати рівень викидів шкідливих речовин водень стає перспективним джерелом енергії для суднових енергетичних систем. У цій роботі подано вдосконалений метод оптимізації застосування водню в суднових двигунах, що

охоплює аналіз термодинамічних процесів, параметрів подавання пального та умов експлуатації.

Алгоритм базований на інтегрованому підході для всіх етапів роботи з воднем, включаючи його виробництво, зберігання, використання та утилізацію. Це дає змогу зменшити енергетичні втрати і підвищити ефективність роботи суднових енергетичних установок. Математична модель, розроблена в рамках дослідження, враховує основні чинники, що впливають на функціонування водневих двигунів, серед яких ефективність використання пального, оптимальні умови зберігання та вплив на навколишнє середовище.

Модель також аналізує технічні аспекти інтеграції водневих систем у сучасний морський флот, включаючи необхідні технологічні зміни, економічну ефективність і екологічні переваги. Крім того, досліджено перспективи впровадження водневих паливних елементів у судноплавстві та їхній потенціал для модернізації сучасних суден.

Результати проведеного дослідження можуть стати основою для створення стратегій переходу на альтернативні джерела енергії в морському транспорті та впровадження ефективніших технологій управління енергією. Зменшення залежності від традиційних видів пального та зниження рівня парникових викидів сприятиме формуванню більш екологічно чистого та енергоефективного флоту, що відповідатиме сучасним міжнародним екологічним стандартам і вимогам.

Ключові слова: водневе паливо, воднева енергетика, морська логістика, ресурсна ефективність, судновий двигун.

Abstract. The use of hydrogen fuel is becoming increasingly important as a direction for the development of environmentally friendly technologies in the field of maritime transport. Due to its high energy efficiency and ability to significantly reduce the level of harmful substances emissions, hydrogen is becoming a promising source of energy for ship power systems. This paper presents an improved method for optimising the use of hydrogen in marine engines, which includes the analysis of thermodynamic processes, fuel supply parameters and operating conditions.

The developed algorithm is based on an integrated approach to all stages of hydrogen operations, including its production, storage, use and utilisation. This helps to reduce energy losses and improve the efficiency of ship power plants. The mathematical model developed as part of the study takes into account the main factors affecting the operation of hydrogen engines, including fuel efficiency, optimal storage conditions and environmental impact.

The model also analyses the technical aspects of integrating hydrogen systems into a modern maritime fleet, including the necessary technological changes, cost-effectiveness and environmental benefits. In addition, the prospects for the introduction of hydrogen fuel cells in shipping and their potential for modernising existing ships are explored.

The results of this study can serve as a basis for developing strategies for the transition to alternative energy sources in maritime transport and the introduction of more efficient energy management technologies. Reducing the dependence on traditional fuels and reducing greenhouse gas emissions will contribute to the formation of a more environmentally friendly and energy efficient fleet that will meet modern international environmental standards and requirements.

Keywords: hydrogen fuel, hydrogen energy, maritime logistics, resource efficiency, marine engine.

Вступ. Сучасні екологічні виклики та міжнародні вимоги щодо декарбонізації транспорту стимулюють пошук альтернативних джерел енергії для морської

галузі. Одним із найбільш перспективних рішень є використання водневого палива, що має високу енергоефективність і не утворює викидів CO₂ під час згоряння.

Впровадження водневих технологій у судноплавство може суттєво знизити негативний вплив галузі на довкілля та сприяти досягненню цілей Міжнародної морської організації щодо зменшення парникових газів.

Проте широке використання водню в судових енергетичних установках супроводжується низкою технічних і економічних викликів – складність процесів зберігання і транспортування, необхідність адаптації паливних систем, безпека експлуатації та вартість виробництва водню є основними аспектами, що визначають можливості його застосування.

У статті досліджено можливості застосування водневого палива в морському транспорті, виділено технологічні аспекти його зберігання, подавання та процесу згоряння. Окремо розглянуто алгоритм, що дає змогу оптимізувати роботу судових двигунів, забезпечуючи ефективніше використання водню. Запропонована математична модель сприяє зменшенню енергетичних втрат і мінімізації рівня шкідливих викидів. Отримані результати можуть стати основою для подальшого розроблення рішень про перехід морської галузі на екологічно безпечні джерела енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Глобальні зусилля зі зниження викидів вуглецю в морському транспорті зумовили необхідність пошуку та впровадження новітніх паливних технологій. Водневе паливо займає головне місце серед перспективних рішень завдяки високій енергетичній щільності, відсутності викидів CO_2 зі згорянням і здатності знижувати рівень викидів NO_x і SO_x [1]. Водночас застосування водню в судових енергетичних установках стикається з низкою технічних викликів, таких як забезпечення зберігання, складність процесів упорскування та необхідність удосконалення технологій згоряння [2, 3].

Сучасна наукова спільнота активно досліджує аспекти використання водневого палива в судноплавстві, що підтверджено

численними працями, присвяченими економічній доцільності та технічним викликам впровадження водню в морські енергетичні системи [4]. Актуальність теми посилена в контексті глобальної стратегії декарбонізації судноплавства [5].

Одним із основних напрямів є вивчення економічної конкурентоспроможності водневого палива порівняно з традиційними вуглеводневими джерелами енергії. Аналіз витрат на виробництво, транспортування та зберігання водню демонструє значні виклики, пов'язані з обмеженістю інфраструктури та потребою в нових логістичних рішеннях [6, 7]. Проте деякі дослідження показують, що зі зростанням попиту на екологічно чисті види пального водень може стати економічно вигідним варіантом для морських перевезень [8, 9].

У технічному аспекті значну увагу приділяють пошуку оптимальних технологій зберігання водню. Варіанти включають зберігання стисненого, зрідженого водню або у вигляді гідридів, кожен із яких має свої переваги та обмеження щодо безпеки, ефективності використання енергії та простору на борту суден [10, 11]. Також активно вивчають можливість інтеграції паливних елементів у морські енергетичні системи для підвищення загальної енергоефективності флоту [12].

Окремий напрям досліджень присвячений впливу водневого палива на роботу судових двигунів і ефективність процесів згоряння. Аналізують можливості модифікації сучасних дизельних двигунів для спільного використання водню і традиційного пального, що дасть змогу забезпечити поступовий перехід до повністю водневих енергетичних установок [13, 14]. Додатково вивчають аспекти оптимізації подавання та спалювання водню з метою мінімізації утворення оксидів азоту за високотемпературного згоряння [15, 16].

Важливим аспектом досліджень є оцінювання екологічного впливу водневих

технологій, оскільки вони здатні значно зменшити викиди парникових газів і сприяти зниженню впливу судноплавства на зміну клімату [17, 18]. Разом із тим існує необхідність розроблення міжнародних стандартів і регламентів для забезпечення використання водню в морській галузі [19, 20].

Аналіз наукових джерел демонструє значний потенціал впровадження водневого палива в морський транспорт, але також вказує на низку проблем, пов'язаних із його зберіганням, транспортуванням, безпекою та ефективністю використання. Завданням цього дослідження є розроблення методів оптимізації використання водню в судових енергетичних системах, які враховують термодинамічні параметри, особливості зберігання і подавання пального, а також експлуатаційні умови роботи суден.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності використання водневого палива в судових енергетичних установках з урахуванням екологічних, технічних та економічних аспектів. Дослідження спрямоване на оптимізацію процесів зберігання, подавання та згоряння водню, що дасть змогу зменшити енергетичні втрати і рівень шкідливих викидів.

Для досягнення мети необхідно оцінити можливості використання водню як судового пального, проаналізувати сучасні технології його виробництва, транспортування та зберігання, визначити технічні виклики, пов'язані з інтеграцією водневих систем у морський транспорт, дослідити екологічні переваги та обмеження цього виду пального, а також сформулювати рекомендації щодо впровадження водневих технологій у судноплавстві відповідно до міжнародних стандартів.

Основна частина дослідження. Судноплавство є одним із найбільших джерел глобальних викидів парникових газів, на яке припадає приблизно 2,9 % загального обсягу викидів. Міжнародна

морська організація (ІМО) поставила перед собою амбітні цілі зі скорочення цих викидів, включаючи мету зменшити викиди парникових газів від судноплавства щонайменше на 50 % до 2050 року. На морський транспорт припадає близько 11 % світового споживання пального, або близько 10 мільйонів барелів на день. Слід зазначити, що в нинішній ситуації конкуренції між альтернативними видами пального судна багато в чому задають тренд на користь того чи іншого виду пального. Значні обсяги споживання пального морським транспортом виправдовують масове виробництво продуктів нафтопереробки, будівництво паливних баз та інфраструктури в цілому, задаючи курс на певний вид пального і спираючись на нього в інших сегментах ринку. Наприклад, після заборони використання судового мазуту у 2024 році залишиться тільки дизельне паливо. Це дає можливість морській транспортній галузі переглянути свою позицію в короткостроковій перспективі до цієї дати і зробити кроки, які більш активно адаптуватимуться до нових стандартів, у тому числі в контексті розгляду альтернативних варіантів.

Водень є одним з альтернативних видів палива, досліджуваним для використання в судноплавстві. Як паливо, водень має низку переваг над традиційними викопними видами палива, такими як дизель і мазут. Однією з головних переваг є те, що зі спалюванням водню як побічний продукт утворюється лише вода, що робить його чистим паливом без викидів. Однак використання водню як пального в судноплавстві пов'язане з певними труднощами. Однією з найбільших проблем є зберігання і транспортування водню, який необхідно стискати або зріджувати для зберігання на борту судна. Для цього потрібне спеціалізоване обладнання та інфраструктура, які наразі обмежені. Іншою проблемою є вартість виробництва водню, яка все ще залишається відносно високою порівняно з традиційними видами пального.

Однак очікують, що з удосконаленням технологій виробництва і зберігання водню та зростання попиту на екологічно чисту енергію вартість водню знижуватиметься.

Безсумнівно, необхідні більш точні і ретельні дослідження для оцінювання впливу альтернативних видів пального на навколишнє середовище, починаючи від видобутку сировини і закінчуючи викидами в навколишнє середовище, щоб ухвалити рішення про вибір переважного виду пального для міжнародних морських перевезень. Окремим питанням є оцінювання наслідків розливів альтернативних видів пального, що потребує проведення лабораторних та експериментальних досліджень розливів, особливо за низьких температур, високих швидкостей вітру тощо. Додатковий інтерес становить ступінь довгострокового впливу сумішей альтернативних видів пального на

водне середовище. Екологічні проблеми і зростання цін на пальне призводять до необхідності пошуку нових рішень для судноплавства. Альтернатив не так багато. У той же час законодавство вже визначило умови використання ЗПГ (зрідженого природного газу), а потім метанолу та біопалива.

На думку експертів, розроблення Кодексу IGF для СПГ і водню не займе багато часу. Для того щоб відповідати вимогам до 2050 року, необхідно буде не тільки перевести флот на інше, екологічно чисте пальне, а й розробити нові технології для скорочення викидів парникових газів із суден. Водне паливо також стало потенційним рішенням для досягнення цих цілей, але його впровадження не позбавлене викликів. Повний цикл виробництва відновлюваного водню показано на рис. 1.

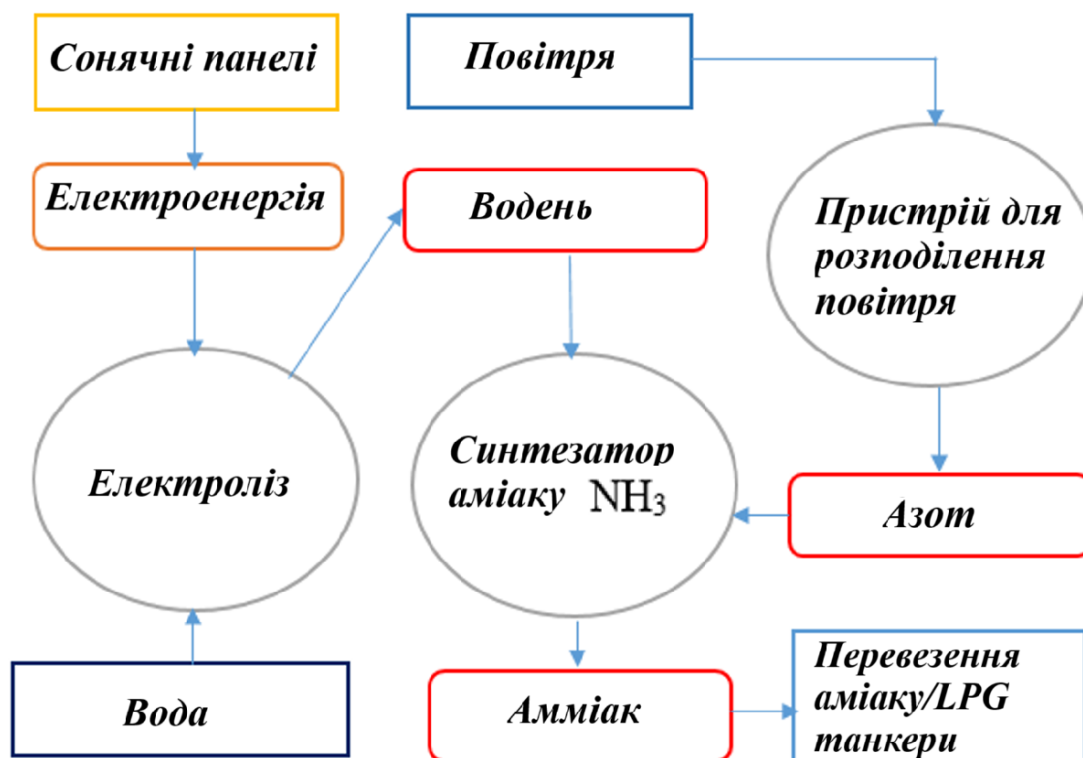


Рис. 1. Цикл виробництва відновлюваного водню

Однією з головних переваг водневого палива є його нульовий профіль викидів. Зі спалюванням водню єдиним побічним продуктом є водяна пара, що робить його чистим і відновлюваним джерелом енергії. Крім того, водневе паливо має високу енергетичну щільність, що означає, що воно може забезпечити більше енергії на одиницю ваги, ніж традиційні викопні види палива. Це може призвести до створення менших та ефективніших систем морських двигунів. H_2 – це більше, ніж просто ще один цікавий альтернативний варіант морського палива, який активно розглядають для використання на судах. Водень або зріджують (кріогенна рідина з температурою $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$) і поміщають у компресійні баки, або зберігають у вигляді хімічної сполуки. Сьогодні H_2 отримують з природного газу та шляхом електролізу. Останнє можна здійснювати на сонячних і вітрових електростанціях одночасно з виробництвом електроенергії. Вироблений з відновлюваних джерел енергії водень стає одним із найчистіших видів палива, з нульовим рівнем викидів парникових газів. Найефективнішим генератором енергії для водню є паливні елементи. Виробництво як водню, так і паливних елементів добре розвинене, але вони все ще залишаються неконкурентоспроможними відносно ціни порівняно зі звичайними судовими двигунами.

Існує кілька поточних проєктів та ініціатив, що досліджують використання водневого палива на судах. У 2020 році у Франції було спущено на воду перше у світі судно на водневих паливних елементах, а кілька інших країн, включаючи Японію, Норвегію та Південну Корею, вже інвестують значні кошти в технологію використання водневого палива для судноплавства. Однак широке впровадження водневого палива на судах все ще перебуває на початковій стадії і

потребує подальшого технологічного прогресу та розвитку інфраструктури.

Водень – найбільш екологічно чисте паливо, вироблене з відновлюваних джерел енергії. Рідкий водень можна використовувати в майбутньому, але він має досить низьку об'ємну щільність енергії, що призводить до необхідності створення великих сховищ.

Стандарт Tier III стосується обмеження викидів оксидів азоту (NO_x) для суден, що працюють на СПГ або водні, з метою зменшення впливу судноплавства на навколишнє середовище. Для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на СПГ або водні, обмеження викидів NO_x встановлено на рівні $3,4\text{ г/кВт}\cdot\text{год}$. Для досягнення стандарту Tier III для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на СПГ або водні, необхідно використовувати різні технології для зниження викидів NO_x , такі як використання каталітичного нейтралізатора, систем рециркуляції вихлопних газів, систем високотемпературного згоряння тощо.

Тому для досягнення стандарту Tier III для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на СПГ або водні, необхідно використовувати багато різних технологій зменшення викидів NO_x , щоб зробити ці двигуни менш шкідливими для навколишнього середовища. Що стосується викидів азоту, то двигуни внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на СПГ або водні, не потребують обладнання для очищення вихлопних газів, щоб відповідати стандарту Tier III. У більшості випадків двопаливні двигуни, що працюють за дизельним циклом, не прийнятні для виконання стандарту. Аналітичні дані про рівень викидів азоту за використання різних видів пального подані на рис. 2.

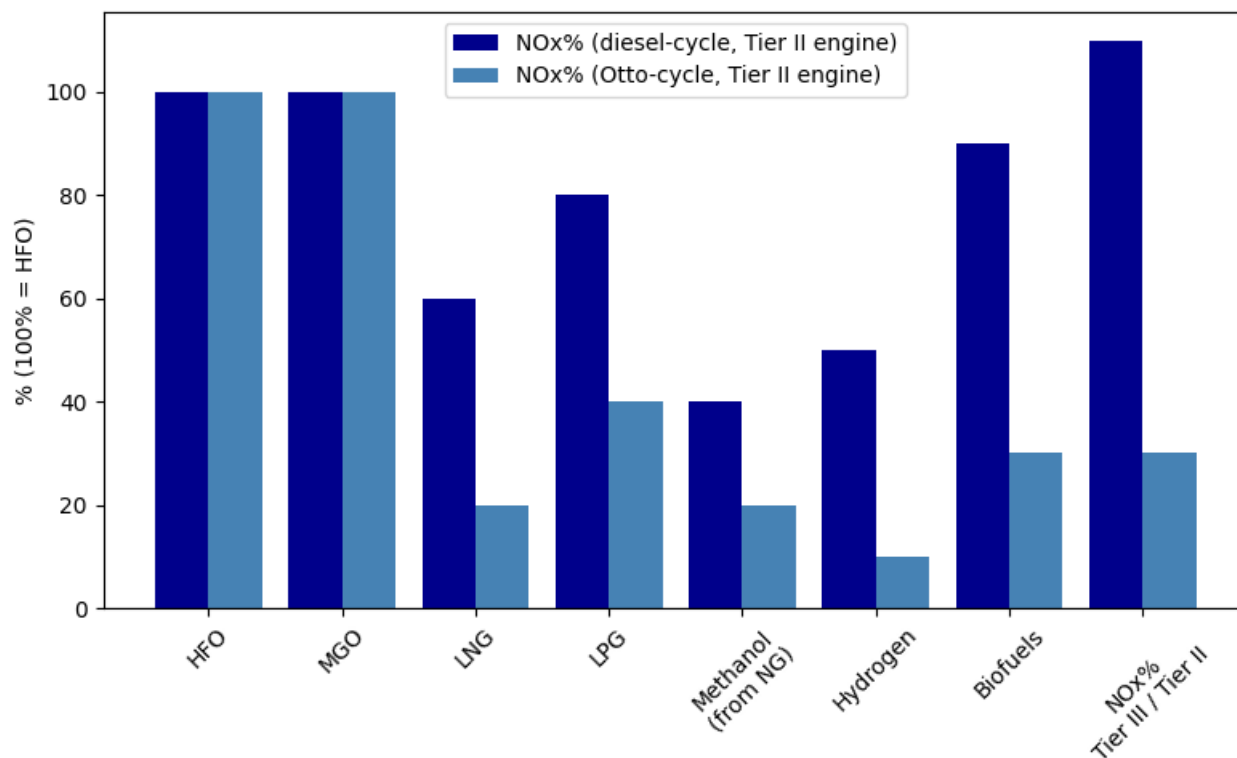


Рис. 2. Викиди азоту від різних видів палива
(джерело: DNV GL)

Потенційно водень можна використовувати у великих масштабах як пальне для кораблів. У найближчі 10-15 років очікують значного зниження собівартості виробництва безвуглецевого водню завдяки розвитку глобальної водневої економіки. Однак безпосереднє використання водню на великотоннажних судах – у двигунах внутрішнього згоряння або паливних елементах разом із електродвигунами – створює проблеми через його низьку об'ємну щільність. Для тривалого плавання зберігання водню потребуватиме занадто великого фізичного об'єму. Використання водневого палива на судах може бути досягнуто за допомогою такого циклу, що складається з виробництва, зберігання, паливних елементів і власне руху.

Алгоритм утилізації водню на морських судах – це складна система, яка

включає виробництво, зберігання, перетворення та утилізацію водню з мінімальними втратами. На першому етапі відбувається забір морської води, її фільтрація та підготовка до електролізу. Система автоматично підключає альтернативні джерела, такі як сонячні панелі, вітрогенератори або хвильові генератори, якщо наявної енергії недостатньо. Чистоту отриманого водню перевіряють перед тим як подати його до паливного елемента або ще раз очищають.

Алгоритм на рис. 3 охоплює повний цикл виробництва, зберігання, використання та утилізації водню на морському судні. Він описує моніторинг усіх етапів, адаптацію до мінливих умов та оптимізацію енергоспоживання. Опис алгоритму наведено в табл. 1.

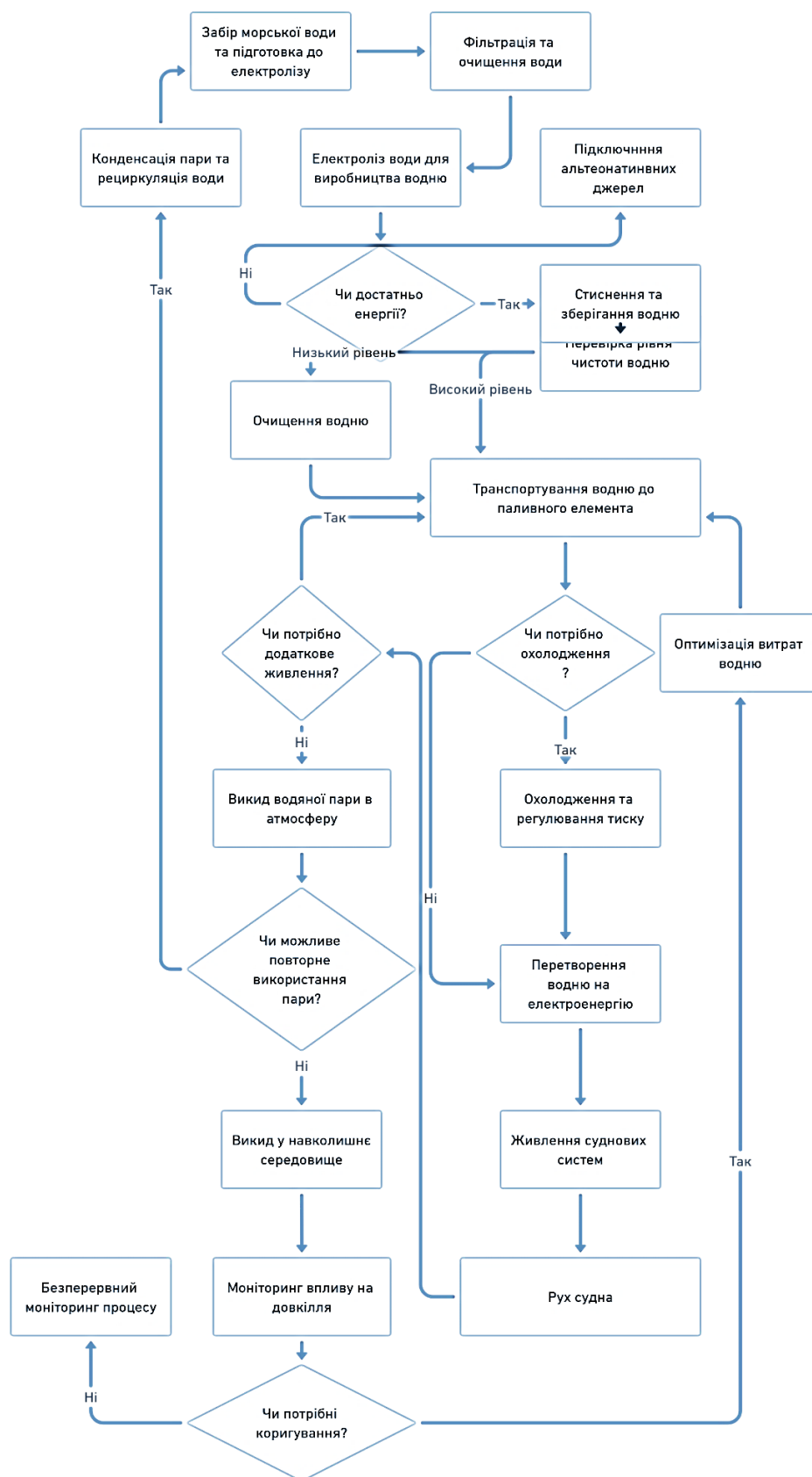


Рис. 3. Алгоритм повного циклу виробництва, зберігання, використання та утилізації водню на судні

Таблиця 1

Алгоритм утилізації водню на морських суднах

Етап	Опис	Перевірки та адаптація
1. Забір морської води та підготовка до електролізу	Забір морської води, фільтрація та очищення води від домішок	Перевірка якості очищеної води
2. Виробництво водню	Процес електролізу води, розкладання H_2O на H_2 та O_2	Система перевіряє рівень енергії для електролізу. Якщо її недостатньо, автоматично підключають альтернативні джерела. За достатньої енергії розпочинається розкладання води на водень і кисень
3. Зберігання та підготовка водню	Стискання та зберігання водню під високим тиском	Перед використанням водень перевіряють на чистоту. Якщо показники відповідають стандартам, його подають у паливний елемент, інакше – очищують і тестують повторно
4. Використання водню для вироблення енергії	Перетворення водню в паливному елементі на електроенергію	Перевірка необхідності охолодження, якщо охолодження потрібне, то відбувається регулювання температури і тиску. Якщо ні, то водень подають у паливний елемент
5. Живлення суднових систем і рух судна	Постачання електроенергії до суднових систем. Використання енергії для руху судна	Перевірка потреби в додатковій енергії. Якщо потрібно більше енергії, то відбувається повторне подавання водню. Якщо енергії достатньо, то наступним етапом є перехід до утилізації
6. Утилізація водяної пари	Водень зі згорянням перетворюється на водяну пару	Можливі варіанти утилізації – конденсація та повторне використання (рециркуляція води в електроліз). Викид в атмосферу (оцінювання екологічного впливу)
7. Моніторинг і адаптація	Моніторинг викидів і впливу на довкілля, оптимізація споживання водню та контроль усіх етапів процесу	Корегування системи для підвищення ефективності та зниження витрат

Під час роботи паливного елемента водень перетворюється на електроенергію для живлення суднових систем і руху судна. Якщо потрібна додаткова потужність, процес можна повторити. Важливою частиною алгоритму є використання утвореної водяної пари: вона може бути сконденсована і повторно використана в

системі електролізу або викинута в атмосферу з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Увесь процес супроводжений постійним моніторингом параметрів і адаптацією до мінливих умов, що робить систему максимально ефективною та екологічно стійкою.

Водень можна виробляти різними методами, окрім електролізу, шляхом парового риформінгу природного газу або газифікації біомаси. Водень зберігають на борту судна в резервуарах високого тиску, криогенних резервуарах або у вигляді гідридів металів. Накопичений водень подають до паливного елемента, який перетворює хімічну енергію водню в електричну за допомогою електрохімічного процесу. Електричну енергію, вироблену паливним елементом, використовують для живлення суднового електродвигуна, який рухає судно вперед. Система зберігання водню – балони високого тиску (40-футовий контейнер із балонами під тиском 25 МПа містить 794 кг водню, 40-футовий контейнер із балонами під тиском 50 МПа – 1050 кг водню). У зрідженому вигляді за температури $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ 40-футовий контейнер містить близько 2 478 кг водню за допомогою ЛОНС (Liquid Organic Hydrogen Carrier) – органічних сполук, здатних поглинати і виділяти водень у результаті хімічних реакцій. 1 м^3 ЛОНС може виробляти 57 кг водню. 40-футовий контейнер може вмістити близько 3200 кг водню, а з урахуванням необхідності зберігання «вивільненої» рідини – близько 1600 кг водню.

Формула оптимізації суднового двигуна, що використовує водень, буде залежати від різних чинників, таких як тип і розмір судна, конкретна конструкція водневого двигуна, умови експлуатації та цілі продуктивності. Однак існує загальна формула, яку можна використовувати як відправну точку:

$$P = (r Q_{(B)}) / \gamma , \quad (1)$$

де P – масові витрати водню, кількість водневого палива, що споживає двигун за одиницю часу, кг/с;

r – вища теплота згоряння водню або кількість теплової енергії, що виділяється з повним згорянням одиниці водню, МДж/кг;

$Q_{(B)}$ – ККД двигуна, відсоток енергії палива, перетвореної двигуном у корисну роботу;

γ – питома вага водню, тобто густина газоподібного водню відносно повітря.

Одним із найважливіших чинників оптимізації роботи судна, що використовує водень як пальне, є максимізація ефективності головного двигуна. Цього можна досягти різними методами, включаючи оптимізацію системи впорскування пального, регулювання моменту запалювання і модифікацію конструкції камери згоряння. Прикладом може слугувати формула для оптимізації роботи суднового двигуна, що працює на водневому паливі:

$$\eta = [(P_{in} - P_{out})/P_{in}] \times Q_{in}/H_{H2} , \quad (2)$$

де η – ККД двигуна;

$P_{(ex)}$ – споживана потужність, кВт;

$P_{(вих)}$ – вихідна потужність, кВт;

$Q_{(ex)}$ – витрати водневого палива, кг/год;

$H_{(H2)}$ – теплота згоряння водню, МДж/кг;

Наведена формула враховує вхідну і вихідну потужність двигуна, а також споживання водневого палива і теплоту згоряння водню. Різницю між вхідною та вихідною потужністю ділять на споживану потужність, щоб визначити ККД двигуна. Витрати водневого палива помножують на теплоту згоряння водню, щоб визначити енергію, яку споживає двигун.

Додаткові чинники, такі як відношення повітря до палива, ступінь стиснення та швидкість рециркуляції вихлопних газів, можуть бути враховані для подальшої оптимізації роботи двигуна. Ретельно відрегулювавши ці чинники, можна досягти максимально можливої ефективності двигуна і мінімізувати споживання пального, викиди та інші впливи на навколишнє середовище. За допомогою поданої тут формули можна розрахувати вихідну потужність водневого двигуна, яка потім може бути використана для оптимізації конструкції і роботи

суднового двигуна і судна в цілому. Для досягнення найкращої продуктивності та ефективності необхідно також враховувати інші чинники, такі як тип і розмір гребного гвинта, конструкцію корпусу та умови експлуатації.

Формула оптимізації суднового двигуна для водневого палива може включати такі елементи:

1. Розрахунок ефективності двигуна, яку можна оцінити за допомогою коефіцієнта корисної дії (теплого ККД), який визначає відношення енергії, що виділяє під час роботи двигун, до енергії, витраченої на його роботу. Коефіцієнт корисної дії двигуна з урахуванням впливу втрат енергії, включаючи механічні та теплові втрати:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_u} \times \left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_u}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

де $\dot{W}$ – корисна потужність, вироблена двигуном;

$\dot{Q}_u$ – підведення тепла до двигуна;

Q_{loss} – втрати тепла внаслідок тертя і теплообміну з навколишнім середовищем.

2. Вибір оптимального способу зберігання водню в різних формах, таких як рідкий водень, стиснений водень або водень, абсорбований на наночастинках. Модель може враховувати вартість і енергоефективність кожного способу зберігання для вибору найкращого варіанта. Масову густину енергії з нижчою теплою згоряння (LHV) водню для розрахунку можна знайти як

$$H_2 = \frac{\dot{W}}{m} \times \left(1 - \frac{Q_{loss}}{Q_u}\right) \times LHV, \quad (4)$$

де m – маса водню, що зберігають у певній формі.

3. Урахування технічних обмежень. Водневі двигуни можуть потребувати особливих технічних вимог, таких як

спеціальна система подавання та зберігання палива, а також додаткові системи охолодження. Модель може врахувати витрати на ці додаткові системи і розрахувати їхній вплив на ефективність двигуна, для того щоб урахувати технічні обмеження: потужність двигуна з урахуванням коефіцієнта корекції на втрати через стискання водню (λ_H):

$$P = \frac{V_b \cdot n_c \cdot N_{max} \cdot \eta_m}{4 \cdot \kappa} \times \lambda_H, \quad (5)$$

де V_b – об'єм двигуна;

n_c – кількість циліндрів;

N_{max} – максимальні оберти двигуна;

η_m – механічний ККД;

κ – ступінь стиснення.

4. Викиди вуглецю. Визначення впливу на навколишнє середовище або викидів забруднюючих речовин зі спалюванням водню з урахуванням впливу ефективності згоряння (η_{comb}) і коефіцієнта перетворення K :

$$E = \frac{V_f \cdot \left(\frac{CO_f}{C_x}\right) \cdot M_x}{V_e \cdot \rho_f} \times \eta_{comb} \times K, \quad (6)$$

де V_f – об'єм палива, спаленого за цикл;

CO_f – кількість оксиду вуглецю, що викидається зі згорянням палива;

C_x – вміст вуглецю в паливі;

M_x – молярна маса вуглецю;

V_e – об'єм викидів забруднюючих речовин;

ρ_f – густина пального.

5. Розрахунок витрат на виробництво двигуна. Модель може враховувати витрати на розроблення і виробництво двигуна, придбання і зберігання водню, обслуговування і ремонт двигуна, підтримку (C_m) і вартість матеріалів (C_{mat}):

$$C = \frac{C_r + C_m + C_{maint} + C_{mat}}{N}, \quad (7)$$

де C_r – витрати на дослідження і розроблення;

C_m – витрати на виробництво;

N – кількість виготовлених двигунів.

6. Вартість водню, включаючи ступінь ефективності електролізу (η_{elect}):

$$C_{H_2} = \frac{C_f}{H_{LHV} \times \eta_{elect}}, \quad (8)$$

де C_f – вартість палива;

H_{LHV} – нижча теплота згоряння водню.

Розроблений алгоритм дає змогу ефективно оптимізувати роботу суднового двигуна, що працює на водневому паливі, з урахуванням термодинамічних параметрів, характеристик згоряння, економічних показників та екологічних аспектів. Основні висновки полягають в оптимізації ККД двигуна (η), що дає змогу знизити втрати енергії та підвищити ефективність використання водню. Аналіз масової енергетичної щільності водню (H_2) допомагає визначити найефективніший спосіб його зберігання (рідина, газ, адсорбція). Формула для розрахунку потужності (P) дає змогу оцінити, як конструкція двигуна і параметри водневого палива впливають на потужність. Використання водню значно знижує викиди CO_2 та інших забруднюючих речовин (E), роблячи двигун більш екологічним. Аналізуючи вартість виробництва (C) та експлуатації водневого двигуна, ураховують витрати на паливо, технічне обслуговування та адаптацію технології.

Загалом алгоритм дає змогу інтегрувати водневі технології в морський транспорт, знижуючи залежність від традиційних вуглеводневих джерел енергії та забезпечуючи високу екологічну ефективність. Але знову ж таки цей

алгоритм є лише загальним прикладом і може суттєво відрізнятись залежно від конкретної моделі двигуна та його параметрів, а також умов експлуатації. Для того щоб найбільш точно розрахувати оптимальні параметри двигуна для водневого палива, необхідно детально проаналізувати техніко-економічні параметри, а також урахувати чинники, що впливають на ефективність роботи двигуна: тиск, температура, швидкість обертання тощо. Тому розрахунок оптимальних параметрів повинен здійснювати спеціалізований персонал із використанням відповідного програмного забезпечення та обладнання. Урахування цих елементів може допомогти розробити оптимальну формулу оптимізації суднового двигуна для водневого палива.

Насправді вартість впровадження альтернативних видів палива на судах не є основним критерієм вибору тієї чи іншої технології; саме вартість палива визначає цей вибір. Вона залежить від кількох чинників, які іноді важко передбачити. За даними джерел, найнижчою є ціна на HFO (судновий мазут), і конкурувати з ним може лише ЗПГ. Ціна на метанол, вироблений із природного газу, вища, ніж на ЗПГ. Біопаливо виробляють з біомаси, і традиційно воно є дорожчим за нафту марки Brent. Ці види палива, імовірно, конкуруватимуть із МРО (дизельним паливом) у майбутньому.

Що стосується водню, то його тут не розглядають, оскільки він набагато дорожчий за інші види палива. Він абсолютно неконкурентоспроможний на ринку відносно ціни, тому матиме шанс стати широко розповсюдженим лише за умов значних субсидій або високих податків на традиційні види палива.

Безсумнівно, використання альтернативних видів палива допоможе судновласникам забезпечити сталість транспортних операцій у довгостроковій перспективі відносно забруднення повітря. Наслідки розливів нових видів палива,

зокрема нафти з низьким вмістом сірки, недостатньо вивчені, але наслідки забруднення морського середовища від розливів є головним чинником кліматичних умов. Використання дистильованого палива призведе до негайного збільшення експлуатаційних витрат, а установка скрубера може виявитися поганою інвестицією, якщо буде введена заборона на використання залишкових видів палива, і інвестиції в обладнання не окупляться вчасно. Ще з більшими ризиками судновласники стикаються з будівництвом нових суден, для яких потрібні великі капітальні вкладення. Нафта і нафтопродукти не мають конкурентів на світовому ринку за своїми властивостями, але регулярна інформація про те, що запаси нафти виснажуються, і зростаючі потреби стимулюють спроби знайти заміну нафті як паливу і сировині.

Незважаючи на переваги водневого палива, існує також низка проблем, які необхідно вирішити для його впровадження на судах. Однією з головних проблем є висока вартість виробництва та зберігання водню. Хоча технологічний прогрес знижує витрати, він все ще дорожчий за традиційні викопні види палива. Крім того, водень легкозаймистий і потребує особливого поводження та заходів безпеки, що робить його потенційною загрозою безпеці на борту суден. Однак водневі дизельні двигуни можуть бути розроблені на основі стандартних середньошвидкісних суднових дизельних двигунів або модернізовані для роботи на водні, тому на основі таких даних можна зазначити, що використання водню як пального на судах – це не віддалена перспектива з технічної точки зору, а цілком реалізована дія.

На основі дослідження використання водневого палива для суднових двигунів можна зробити такі висновки:

- водневе паливо є одним із найперспективніших альтернативних джерел енергії для судноплавства, оскільки дає змогу значно скоротити викиди

шкідливих речовин і зменшити залежність від нафтопродуктів;

- розроблення математичної моделі для оптимізації суднового двигуна на водневому паливі може допомогти підвищити ефективність двигуна, зменшити витрати на паливо та підвищити загальну екологічність морського транспорту;

- впровадження водневого палива на морському транспорті стало можливим завдяки розвитку технологій його виробництва і зберігання, а також створенню відповідної інфраструктури для заправлення і транспортування.

Одним із найважливіших аспектів застосування водню в судноплавстві є його безпечне та ефективне зберігання на борту кораблів. Основними підходами для цього є використання стисненого газу, зрідженого водню або металогідридних акумуляторів. Кожен із цих методів має переваги і недоліки, зокрема щодо енергетичної щільності, рівня безпеки та фінансових витрат.

Діяльність водневих енергетичних установок значною мірою визначена коефіцієнтом корисної дії двигуна, що відображує ефективність перетворення енергії палива в корисну потужність. Максимізація цього показника є критично важливою для підвищення продуктивності суднових енергетичних систем.

Ще одним серйозним технічним викликом є процес упорскування водню в камеру згоряння, для чого потрібна модифікація паливної системи для забезпечення стабільного та ефективного горіння. Покращення цього процесу дає змогу підвищити продуктивність двигуна, скоротити втрати енергії та забезпечити рівномірний розподіл пального в зоні згоряння. Однак необхідно враховувати екологічні аспекти використання водню. Попри те, що з його спалюванням не утворюється CO_2 , за високих температур можуть утворюватися оксиди азоту, що потребує впровадження додаткових технологічних рішень для їх мінімізації.

У табл. 2 подано основні труднощі, які виникають з інтеграцією водневих технологій у морський транспорт. Одним із головних питань залишається вибір оптимального способу зберігання водню,

оскільки кожен із можливих варіантів — стиснений, зріджений або металогібридний водень — має свої переваги та недоліки з точки зору безпеки, енергоефективності та економічної доцільності.

Таблиця 2

Основні виклики процесу впровадження водневих технологій на морському транспорті

Проблема	Опис
Методи зберігання водню	Використання стисненого, зрідженого водню або металогібридних накопичувачів. Оцінювання щільності енергії, рівня безпеки та вартості
Ефективність двигуна	Розрахунок коефіцієнта корисної дії (ККД) двигуна, визначення співвідношення корисної потужності і загальної теплоти
Оптимізація впорскування	Адаптація системи подавання водню, забезпечення рівномірного розподілу палива в камері згоряння, зменшення енергетичних втрат
Вплив на навколишнє середовище	Мінімізація утворення оксидів азоту за високих температур, використання технологій нейтралізації забруднень
Методологія оптимізації	Комплексне розроблення оптимальних рішень для впровадження водневих технологій у морському транспорті

Отже, для успішного впровадження водневих технологій у морському транспорті необхідно розробити комплексну методологію оптимізації суднових енергетичних установок. Вона має включати ефективні методи зберігання, вдосконалену систему подавання водню та заходи для мінімізації екологічного впливу. Це дасть змогу підвищити загальну ефективність водневих двигунів, знизити рівень викидів і забезпечити відповідність сучасним екологічним стандартам.

Перспективи подальшого розвитку та використання водневого палива на морському транспорті є дуже обнадійливими. Потреба у зменшенні викидів шкідливих речовин і залежності від нафтопродуктів зростає з кожним роком, і водневе паливо є одним з основних елементів у вирішенні цих проблем. Крім того, сучасні технології виробництва та зберігання водневого палива слід удосконалювати, що може призвести до зниження витрат і підвищення

конкурентоспроможності порівняно з традиційними видами палива.

Висновок. Дослідження підтверджує, що водневе паливо має великий потенціал як альтернатива традиційним енергоносіям у судноплавстві завдяки своїм екологічним та енергетичним перевагам. Поданий у роботі адаптивний алгоритм управління водневим паливом сприяє ефективному виробництву, зберіганню, використанню та утилізації водню на борту суден. Він ураховує основні технічні та економічні чинники, що впливають на загальну продуктивність водневих енергетичних систем.

Запропонована математична модель дає змогу оцінити ефективність роботи двигуна, оптимізувати умови зберігання водню та зменшити екологічний вплив завдяки зниженню рівня викидів. Дослідження різних методів зберігання водню, зокрема у формі стисненого, зрідженого газу або металогібридних накопичувачів, демонструє їхню ефективність залежно від умов експлуатації

судна. Впровадження подібних технологій потребує значних інвестицій у розвиток відповідної інфраструктури, однак у довгостроковій перспективі це дасть змогу значно зменшити залежність судноплавства від викопних паливних ресурсів.

Крім того, запропонована система моніторингу енергоспоживання дає змогу адаптувати роботу енергетичних установок

до змінних умов експлуатації, підвищуючи безпеку і стабільність судових систем. Подальші дослідження в цій сфері мають бути зосереджені на розробленні нових матеріалів для ефективнішого зберігання водню, вдосконаленні технологій подавання палива та створенні міжнародних нормативів для водневих енергетичних систем.

Список використаних джерел

1. Melnyk O. et al. (2024). Innovative technologies for the maritime industry: Hydrogen fuel as a promising direction. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, A. Yakovlieva, & I. Shkilniuk (Eds.). *Modern technologies in energy and transport* (Studies in Systems, Decision and Control). Vol. 510. P. 95-103. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_3.
2. Solakivi T., Paimander A. & Ojala L. (2022). Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 113. 103500. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103500>.
3. Kouzelis K., Frouws K. & van Hassel E. (2022). Maritime fuels of the future: What is the impact of alternative fuels on the optimal economic speed of large container vessels. *Journal of Shipping and Trade*. 7. <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00124-7>.
4. Huang J., Fan H., Xu X. & Liu Z. (2022). Life cycle greenhouse gas emission assessment for using alternative marine fuels: A very large crude carrier (VLCC) case study. *Journal of Marine Science and Engineering*. 10. 1969. <https://doi.org/10.3390/jmse10121969>.
5. Heine D., GGde S. & Dominioni G. (2014). Unilaterally removing indirect subsidies for maritime fuel. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2512747>.
6. Md Moshilul A., Mohammad R., Hira F. & Maarop N. (2022). Alternative marine fuel research advances and future trends: A bibliometric knowledge mapping approach. *Sustainability*. 14. <https://doi.org/10.3390/su1409494>.
7. Pekşen D. & Alkan G. (2018). Application of alternative maritime power (AMP) supply to cruise port. *Journal of ETA Maritime Science*. 6. 307–318. <https://doi.org/10.5505/jems.2018.15870>.
8. Benet Á., Villalba-Herreros A., d'Amore-Domenech R. & Leo T. J. (2022). Knowledge gaps in fuel cell-based maritime hybrid power plants and alternative fuels. *Journal of Power Sources*. 548. 232066. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232066>.
9. Barberi S., Campisi T. & Neduzha L. (2022). The role of cold ironing in maritime transport emissions. In *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2611. P. 060013. <https://doi.org/10.1063/5.0119881>.
10. Wang Q., Zhang H., Huang J. & Zhang P. (2023). The use of alternative fuels for maritime decarbonization: Special marine environmental risks and solutions from an international law perspective. *Frontiers in Marine Science*. 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1082453>.
11. Melnyk O. & Onyshchenko S. (2022). Ensuring safety of navigation in the aspect of reducing environmental impact. In *ISEM 2021, LNNS*. Vol. 463. P. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9.
12. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Golikov V., Sapiha V., Shcherbina O. & Andrievska V. (2022). Study of environmental efficiency of ship operation in terms of freight transportation effectiveness provision. *TransNav, International Journal of Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 16(4). 723–729. <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.14>.

13. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S. & Obertiur K. (2022). Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology*. 116. 223–235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
14. Melnyk O., Onyshchenko S. & Koryakin K. (2021). Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. *Scientific Journal of Silesian University of Technology*. 113. 145–153. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.11>.
15. Yakovlieva A. & Boichenko S. (2020). Energy efficient renewable feedstock for alternative motor fuels production: Solutions for Ukraine. *Studies in Systems and Decision Control*. 298. 247–259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_16.
16. Minchev D., Varbanets R., Aleksandrovskaya N. & Pisintsaly L. (2021). Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues. *Acta Polytechnica*. 3(61). 428–440. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435>.
17. Alternative Fuels and Technologies for Greener Shipping: DNV GL. (2018). Summary of an assessment of selected alternative fuels and technologies. <https://www.dnv.com>.
18. Maritime Safety Agency: Update on potential of biofuels in shipping. (2022). EMSA, Lisbon. <https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4834-update-on-potential-of-biofuels-for-shipping.html>.
19. Li Y., Wei W., Li Y. & Huang T. (2021). Research on the optimization of ship propulsion system based on hydrogen fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9(3). 278.
20. Kulkarni P., Shah P. & Kulkarni P. (2020). Fuel cell technology for maritime applications. *International Journal of Maritime Engineering*. 162(1). 55–64.
21. Chen J., Zhang H. & Liu B. (2019). Energy efficiency optimization of a hydrogen-powered container ship. *Journal of Marine Science and Engineering*. 7(10). 318.
22. Ghafir M. F. A., Harahap I. S. H. & Taufik T. (2018). Technical and economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell power plant for Indonesian ferry. *International Journal of Renewable Energy Research*. 8(3). 1361–1371.
23. Chen H., Zhang X., Wu Y. & Huang Y. (2017). A review of research on hydrogen energy storage technology. *International Journal of Hydrogen Energy*. 42(20). 14345–14363.
24. Hoang D. L., Kim T. & Lee K. (2020). Hydrogen fuel cell systems for ships: A review. *Journal of Cleaner Production*. 246. 119025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119025>.
25. Konold W. E. (2020). Maritime energy transition: Hydrogen fuel cells as a future alternative for shipping. *Transportation Policy*. 89. 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.04.007>.
26. Li Y., Li P. (2020). Feasibility analysis of hydrogen energy application in shipping industry. *Energy Procedia*. 187. 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2020.07.015>.
27. Schmieder P. & Krieg O. (2020). Perspectives of hydrogen use for ship propulsion. *Journal of Marine Science and Engineering*. 8(12). 994. <https://doi.org/10.3390/jmse8120994>.
28. Su H., Peng H., Lin Y. & Wang Z. (2020). Investigation of hydrogen fuel cell ships considering different operation modes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 45(50). 27676–27684. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.192>.

Мельник Олексій Миколайович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Булгаков Микола Петрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. E-mail: npbulgakov2@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7172-8678.

Волошин Дмитро Андрійович, здобувач наукового ступеня доктора філософії кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0009-0005-3458-1450.

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.

Bulgakov Mykola, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. E-mail: npbulgakov2@gmail.com.

ORCID: 0000-0002-7172-8678.

Voloshyn Dmytro, Doctor of Philosophy (PhD) candidate at the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0009-0005-3458-1450.

Статтю прийнято 25.02. 2025 р.

УДК339.5:656.2

ВПРОВАДЖЕННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МИТНОГО КОНТРОЛЮ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ

Кандидати техн. наук І. В. Берестов, О. С. Пестременко-Скрипка, А. В. Колісник

IMPLEMENTATION OF THE LATEST TECHNOLOGIES FOR CARRYING OUT CUSTOMS CONTROL DURING TRANSPORTATION OF CARGO BY RAIL TRANSPORT

PhD (Tech.) I. Berestov, PhD (Tech.) O. Pestremenko-Skrypka, PhD (Tech.) A. Kolisnik

***Анотація.** Диджиталізація митного контролю є основним напрямом реформування міжнародних залізничних вантажоперевезень, спрямованим на підвищення ефективності митних процедур, скорочення часу оформлення вантажів і мінімізацію затримок на кордоні. У статті досліджено сучасні цифрові технології, такі як QR-коди, електронний документообіг та інтегровані платформи обміну даними. Запропоновано математичну модель оптимізації митного контролю, що дає змогу підвищити швидкість і точність виконання технологічних операцій під час перевезення вантажів.*

***Ключові слова:** міжнародні вантажні перевезення, митний контроль та оформлення, диджиталізація, цифровізація, QR-коди, митні декларації.*

***Abstract.** Key directions of customs control digitalization for international freight flows transported by rail include electronic cargo declaration, digital transport documents, big data utilization and analytics, real-time data exchange systems, integration with customs systems of neighboring countries, and blockchain technology for ensuring transparency and security. These technologies contribute to the automation of customs clearance processes, enhancing their accuracy and efficiency. The primary advantages of customs digitalization lie in the reduction of paperwork, lower processing costs, and the elimination of redundant work.*

The aim of this study is to develop and implement proposals for improving the digitalization of customs control and clearance processes during international freight transportation by rail. The goal is to increase the efficiency, transparency, and speed of customs procedures, reduce human intervention, and minimize cargo delays through the application of modern information technologies, such as QR codes, electronic document management, and integrated digital platforms.

The expected outcomes of this study include a reduction in customs clearance time, a decrease in documentation errors, an increased level of automation, and enhanced coordination between

customs authorities across different countries. By streamlining the interaction between railway transport operators and customs services, digitalization helps optimize the overall logistics process.

This paper proposes a mathematical model for optimizing customs control processes, incorporating QR codes to automate the identification of transport documents and reduce the time required for technological operations. The study improves digitalization algorithms by integrating modern technologies such as electronic document circulation, automatic declaration verification, and the creation of a unified data exchange platform between customs authorities of different countries. A new approach to assessing the efficiency of customs control is introduced, taking into account the probability of successful QR code data scanning and the impact of digital technologies on reducing procedural times.

Keywords: international freight transportation, customs control and clearance, digitalization, QR codes, customs declarations.

Вступ. За сучасних умов глобалізації та зростаючих обсягів міжнародної торгівлі ефективність митного контролю відіграє головну роль у розвитку транспортної логістики. Особливо актуальним це питання стає для залізничних вантажних перевезень, де швидкість і точність митних процедур безпосередньо впливають на економічні показники та конкурентоспроможність країни. Впровадження цифрових технологій у цей процес відкриває нові можливості для оптимізації перевізного процесу, зниження витрат і мінімізації затримок. У статті розглянуто основні проблеми та перспективи диджиталізації митного контролю в залізничних перевезеннях, що є важливим аспектом інтеграції України у світові економічні процеси.

Основними напрямками диджиталізації митного контролю для міжнародних вантажопотоків, що перевозять залізничним транспортом, є електронне декларування вантажів, цифрові транспортні документи, використання великих даних і аналітика, система обміну даними в реальному часі, автоматизовані системи управління ризиками, інтеграція з митними системами сусідніх країн, блокчейн для забезпечення прозорості та безпеки.

Основними перевагами диджиталізації митного контролю та оформлення є те, що автоматизація зменшує потребу в паперових документах, знижує витрати на обробку та усуває дублювання роботи. Цифрові процеси значно пришвидшують

оформлення, зменшують час очікування на кордоні та сприяють більш швидкому переміщенню вантажів [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За сучасних умов глобалізації та інтеграції України до світової економіки питання вдосконалення митного контролю під час перевезення вантажів залізничним транспортом набуває особливої актуальності. Розвиток інформаційних технологій і цифровізація процесів відкривають нові можливості для підвищення ефективності митних процедур.

Проблематику цифровізації митного контролю активно досліджують як вітчизняні, так і зарубіжні науковці. Зокрема, у роботі В. О. Задоя та С. А. Костюка [2] проаналізовано сучасні виклики та перспективи розвитку залізничних вантажних перевезень в Україні, зокрема інтеграцію нових технологій для підвищення ефективності транспортної системи. Автори підкреслюють важливість цифровізації для оптимізації логістичних процесів і покращення митного контролю. В. І. Яровий [3] досліджує теоретичні засади цифровізації контейнерних перевезень, акцентуючи на впровадженні технологій штучного інтелекту, блокчейну та інтелектуальних систем управління. Ці технології сприяють оптимізації вантажних операцій і підвищенню прозорості в ланцюгах постачання, що безпосередньо впливає на ефективність митного контролю.

Г. І. Шелехань та ін. [4] у своєму дослідженні звертають увагу на організацію раціонального митного контролю на прикордонних передавальних станціях України. Автори підкреслюють важливість електронного декларування та покращення інформаційної складової перевізного процесу для швидкої обробки вагонів та ефективної взаємодії з митними органами.

У роботах зарубіжних науковців також досліджено напрями цифровізації залізничного транспорту, зокрема у роботах [5-7] цифрову трансформацію розглянуто як важливий фактор для підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту, що дає змогу покращити обслуговування клієнтів, оптимізувати використання ресурсів і підвищити ефективність роботи. Стаття також охоплює вплив цифрових технологій на різні аспекти залізничного транспорту, включаючи організаційні зміни, взаємодію з клієнтами та управління операційними процесами.

Незважаючи на значний прогрес у дослідженні цифровізації митного контролю на залізничному транспорті, залишаються аспекти, які потребують подальшого вивчення, такі як впровадження та використання QR-кодів для вантажної митної декларації, електронного документообігу та інтегрованих платформ обміну даними. Також недостатньо досліджень щодо практичного застосування цих технологій і моделі в реальних умовах і оцінювання їхнього впливу на ефективність митного контролю та безпеку перевезень. Крім того, потребують додаткового вивчення питання інтеграції цих технологій із сучасними системами митного контролю та забезпечення їх сумісності. Подальші дослідження в цих напрямках сприятимуть підвищенню ефективності митного контролю для перевезення вантажів залізничним транспортом та інтеграції України у світову економічну спільноту.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є розроблення і впровадження пропозицій щодо

удосконалення процесів диджиталізації митного контролю та оформлення під час здійснення міжнародних вантажних перевезень залізничним транспортом. Це сприятиме підвищенню ефективності, прозорості та швидкості виконання митних процедур, зниженню впливу людського фактора, а також мінімізації затримок вантажів за рахунок застосування сучасних інформаційних технологій, таких як QR-коди для вантажної митної декларації.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішують завдання з визначення основних проблем, пов'язаних із традиційним митним контролем, включаючи затримки вантажів, паперовий документообіг і низький рівень автоматизації та розроблення математичної моделі оптимізації процесів митного контролю із застосуванням QR-кодів для автоматизації ідентифікації перевізних документів.

Виконання зазначених завдань дасть змогу підвищити ефективність митного контролю, скоротити час митного оформлення, зменшити кількість помилок у документації, покращити координацію між митними органами різних країн і сприяти розвитку інноваційних підходів для організації митних процедур у сфері залізничного транспорту.

Основна частина дослідження. Затримки міжнародних вантажних вагонопотоків на залізничному транспорті можуть бути спричинені різними факторами, зокрема проблемами на етапах митного оформлення та контролю, що знижує ефективність перевезень, підвищує витрати і створює додаткові труднощі для всіх учасників процесу. Сучасні цифрові технології, зокрема диджиталізація митних декларацій, можуть значно покращити ефективність і швидкість митних процедур, зменшивши кількість затримок і спростивши обробку вантажів на прикордонних станціях. На рис. 1 наведено причини затримок міжнародних вантажопотоків у залізничному сполученні та можливі методи їх вирішення через диджиталізацію [8, 9].



Рис. 1. Основні причини затримок міжнародних вантажопотоків на прикордонних передавальних станціях під час митного оформлення

До основних причин затримок міжнародних вантажопотоків можна віднести:

- тривале митне оформлення вантажів, яке включає перевірку документів,

сертифікатів, товарно-транспортних накладних і може призводити до значних затримок на прикордонних станціях;

- помилки в заповненні митних декларацій або документах вантажів (неправильні коди товарів, відсутні сертифікати або ліцензії), що часто призводять до затримок під час митного оформлення;
- відмінності в митних вимогах між країнами, адже кожна країна має свої специфічні митні вимоги, стандарти оформлення товарів, сертифікацію та процедури, що може спричиняти затримки під час переходу вантажів через кордони;
- ручну обробку документів, що часто викликає затримки, оскільки потребує часу для перевірки, підпису та підтвердження документів. Усі ці етапи можуть значно збільшити час митного оформлення;
- затримки, спричинені недостатньою координацією між митними органами різних країн, коли інформація про вантаж не синхронізована вчасно;
- зростання під час пікових періодів (сезонних навантажень) обсягів вантажопотоків, що може призвести до значних затримок на митних пунктах і прикордонних станціях.

В останні роки диджиталізація митної сфери стосувалася переважно розвитку електронного декларування. Сьогодні ж ця сфера доповнена імплементацією новітніх технічних засобів митного контролю, зокрема сканувальних систем, які дають змогу мінімізувати прямі контакти між суб'єктами зовнішньоекономічної сфери та працівниками митних органів [9].

Впровадження новітніх технологій для проведення митного контролю та оформлення міжнародних вантажів під час перевезення залізничним транспортом може значно покращити ефективність, зменшити час затримок вагонів і збільшити безпеку на прикордонних станціях. Однією з таких технологій може стати впровадження QR-кодів для митної декларації.

QR-коди можуть значно зменшити час, необхідний для обробки митних документів. Завдяки цифровому коду митні органи можуть миттєво отримати всю інформацію про вантаж, щоб швидше перевіряти документацію та знижувати ймовірність людських помилок.

На рис. 2 наведено основні переваги впровадження QR-кодів для митної декларації.

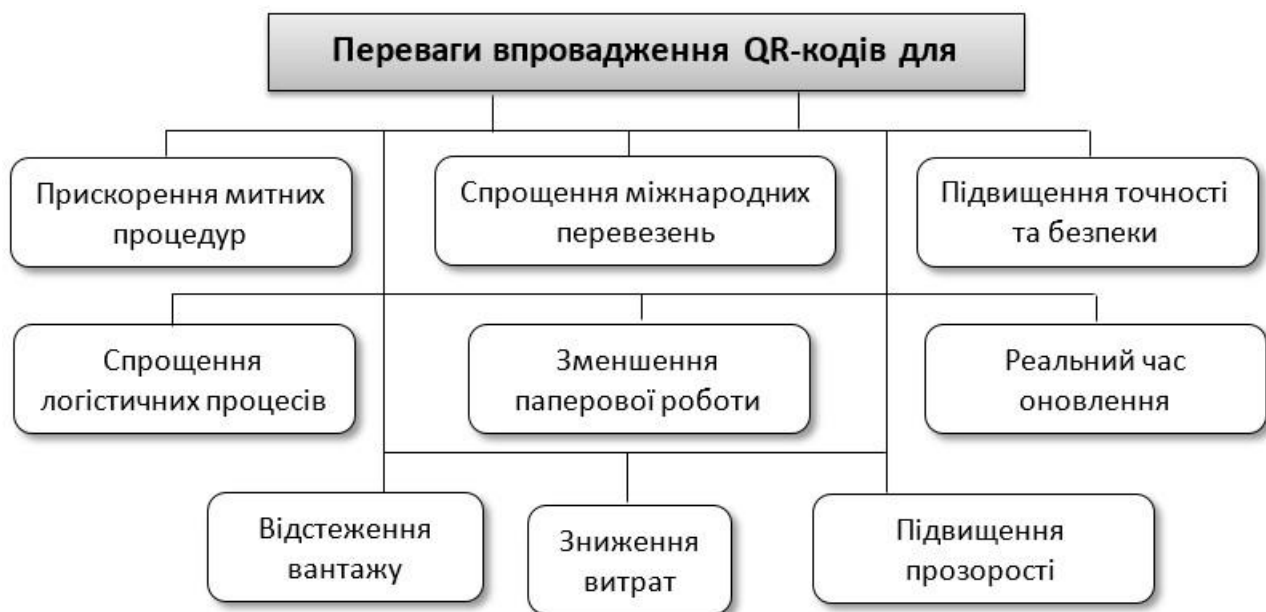


Рис. 2. Основні переваги впровадження QR-кодів для митної декларації

Впровадження QR-коду для митних декларацій є важливим кроком у цифровізації залізничного транспорту, що зробить процеси більш зручними для всіх

учасників — від перевізників до митників і кінцевих клієнтів. Наприклад, у статті розроблено QR-код для митної декларації (рис. 3).



УКРАЇНА 3 8 1000.PL Sp. z o.o. PL/0000000000 ul. Kasik 4, 30-549 Krakow 000/0000/000000 UA/0040487681 ТОВАРИСТВО З ОМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ЗМІІВСЬКА ПАПЕРОВА ФАБРИКА" 63402, ХАРКІВСЬКА ОБЛ., ЗМІІВСЬКИЙ Р. М. ЗМІІВ, ВУЛ.ФАБРИЧНА, 11 UA10040487681		ІМЕНА IM 40 DE 1 1 1 1 84 Вис. № 1803 UA/0040487681 ТОВАРИСТВО З ОМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ФАБРИКА ПАПЕРОВА" UA10040487681 319586.83 ПЦ Польща EUR 4762.8000 46.23960000 011 EUR СДРПОВ: 14360570 Харківське ГРУ АТ КБ "ПриватБанк" МФО: 351533	
3 8 UA205090 Волоська митниця 1. Макулатура відсортована; Відходи багаторециклізовані; Упаковки відповідно до стандарту МС-12Г-45360К, забарвлені в масі, являє собою відходи використання паперу, картону та гофрокартону з просоченням і покриттям, охоплених вологостійкі, ламіновані, проклені спеціальними клеями. Див. доп.		0380 EV2024/09/13 11.09.24 0722 316.03 11.09.24 0862 EV2024/09/13 20.01.23 m1103 20.01.23 m1103 20.01.23 m1103 20.01.23 44207165 09.05.23	
020 319586.83 0 % 0.00 01 028 319586.83 20 % 63917.37 06		4762.8000 6 319586.83 319.58683	
020 319586.83 0 % 0.00 01 028 319586.83 20 % 63917.37 06		4762.8000 6 319586.83 319.58683	

Рис. 3. Митна декларації та її QR-код

Впровадження QR-кодів для вантажної митної декларації дасть змогу оптимізувати низку технологічних операцій на прикордонних передавальних станціях, скорочуючи час на виконання окремих етапів.

Математична модель виконання технологічних операцій для міжнародних вантажопотоків через прикордонну залізничну станцію із використанням QR-кодів базована на описі послідовних операцій, часу їх виконання та ефективності. Модель побудована як

система масового обслуговування або логістична мережа з оптимізацією ресурсів.

Основні змінні та параметри:

T_i – час виконання операції i (наприклад сканування QR-коду, перевірка декларацій, митна перевірка);

N – кількість вагонів у складі поїзда;

λ – інтенсивність прибуття вантажів (наприклад кількість поїздів за годину);

μ_i – продуктивність операції i (кількість одиниць обробленого вантажу за одиницю часу);

P_{QR} – імовірність успішного зчитування QR-коду;

t_{error} – додатковий час на ручну перевірку в разі помилки QR-коду;

K_i – кількість робочих ресурсів (персоналу або обладнання) для виконання операції i .

Цільова функція мінімізації загального часу обробки вантажу на прикордонній передавальній станції має вигляд

$$T_{заг} = \sum_{i=1}^m T_i \rightarrow \min \quad (1)$$

за обмежень

$$\begin{cases} \mu_i \geq \lambda; \\ P_{QR} \cdot \mu_{скан} + (1 - P_{QR}) \cdot t_{error} \leq T_{скан}, \\ \sum_{i=1}^m K_i \leq K_{заг} \end{cases} \quad (2)$$

де m – кількість операцій;

$T_{скан}$ – час, виділений на сканування декларацій;

$K_{заг}$ – загальна кількість доступних ресурсів.

Продуктивність кожної операції має бути $\mu_i \geq \lambda$, щоб уникнути затримок.

Надійність системи зчитування QR-кодів: $P_{QR} \cdot \mu_{скан} + (1 - P_{QR}) \cdot t_{error} \leq T_{скан}$.

Логістичний потік: $\sum_{i=1}^m K_i \leq K_{заг}$.

На рис. 4 зображено кумулятивний час виконання операцій для міжнародних вантажопотоків із використанням QR-кодів.

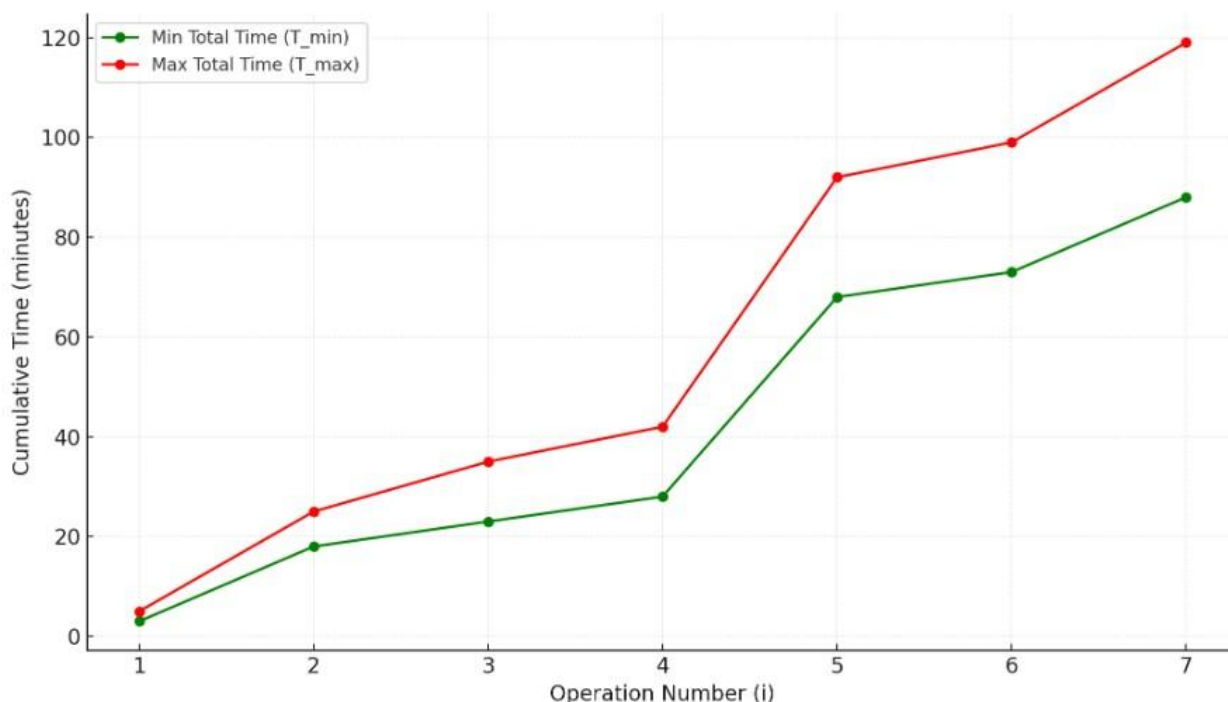


Рис. 4. Графік кумулятивного часу виконання операцій для міжнародних вантажопотоків із використанням QR-кодів

Зелена лінія (T_{min}) відображує найкоротший можливий час виконання кожної операції.

Червона лінія (T_{max}) показує максимальний час, який може бути витрачено.

Цільова функція зведена до мінімізації сумарного часу виконання всіх операцій, що показано тенденцією наближення до нижньої межі T_{min} .

За допомогою математичної моделі можлива оптимізація:

1) зменшення часу на ручну перевірку; впровадження динамічних QR-кодів, що дають змогу зчитувати статус декларації в реальному часі;

2) оптимальний розподіл ресурсів; використання теорії черг для балансування потоків операцій;

3) прогнозування затримок; машинне навчання для аналізу попередніх даних і оптимізації графіка роботи.

Отже, розроблена математична модель дає змогу визначити вузькі місця у процесі обробки міжнародних вантажопотоків, прогнозувати час простоїв і оптимізувати графік роботи прикордонної станції для підвищення продуктивності.

Висновки. У роботі проаналізовано сучасні підходи для диджиталізації митного контролю в міжнародних залізничних вантажоперевезеннях. Визначено основні проблеми, пов'язані з традиційними методами митного оформлення, серед яких

затримки через ручну обробку документів, помилки в деклараціях і низький рівень автоматизації процесів. Запропоновані рішення передбачають використання QR-кодів, електронного документообігу та інтегрованих цифрових платформ для оптимізації митного контролю та прискорення технологічних операцій. Впровадження цих технологій дає змогу зменшити час виконання митних процедур на 30-40 % залежно від специфіки вантажу та інфраструктури митних пунктів.

Розроблена математична модель дає змогу оцінити вплив цифровізації на ефективність митного оформлення. Вона враховує такі фактори, як час виконання операцій, продуктивність системи, імовірність помилок і затримок. Аналіз результатів показав, що впровадження QR-кодів і автоматизованих алгоритмів знижує час перевірки документів, мінімізує людський фактор і покращує координацію між митними органами різних країн.

Практичне застосування запропонованих методів сприятиме зниженню витрат, підвищенню прозорості митних процедур і поліпшенню логістичної ефективності міжнародних перевезень залізничним транспортом. Диджиталізація митного контролю є важливим кроком на шляху інтеграції України в глобальні логістичні процеси та підвищення її конкурентоспроможності на світовому ринку.

Список використаних джерел

1. Берестов І. В., Пестременко-Скрипка О. С., Шелехань Г. І. Цифровізація процесів митного контролю та митного оформлення вантажів на залізничному транспорті. *Центральноукраїнський науковий вісник*. 2022. Вип. 5 (36). Ч. II. С. 291-298. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_II/36_II_Berestov.html (дата звернення 20.02.2025).
2. Задоя В. О., Костюк С. А. Сучасні виклики та перспективи розвитку залізничних вантажних перевезень України. *Агросвіт*. 2024. № 18. С. 84-91. URL: https://nayka.com.ua/index.php/agrosvit/article/download/4570/4608/10512?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 20.02.2025).

3. Яровий В. І. Теоретичні засади цифровізації контейнерних перевезень. *Економіка та суспільство*. 2024. № 66. URL: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/download/4665/4607/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 20.02.2025).
4. Hanna Shelekhan, Olena Mkrtychyan, Anastasiia Afonina. Research of the state of customs clearance of cargo at the Ukrainian border transfer points. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 67-72. URL: https://www.researchgate.net/publication/375321658_Research_of_the_state_of_customs_clearance_of_cargo_at_the_Ukrainian_border_transfer_points/fulltext/654657bdce88b87031c30a49/Research-of-the-state-of-customs-clearance-of-cargo-at-the-Ukrainian-border-transfer-points.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 20.02.2025).
5. Mirosław Antonowicz, Jakub Majewski. Digital Transformation in Railway Transport. *Extending Boundaries: The Impact of the Digital World on Consumers and Marketing*. 2023. Р. 139-158. URL: <https://bibliotekanauki.pl/chapters/2048278.pdf> (дата звернення 20.02.2025).
6. Mazurek G. Transformacja cyfrowa. Warsaw: Wydawnictwo Naukowe PWN. 2019. URL: Transformacja cyfrowa - Grzegorz Mazurek (Książka) - Księgarnia PWN (дата звернення 20.02.2025).
7. Śledziwska K., Włoch R. Gospodarka cyfrowa. Jak technologie zmieniają świat. Warsaw: Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego. 2020. URL: Gospodarka cyfrowa. Jak nowe technologie zmieniają świat (дата звернення 20.02.2025).
8. Пестременко-Скрипка О. С. Удосконалення технології роботи прикордонних передавальних станцій шляхом формування системи управління ризиками : дис. ... канд. техн. наук / 05.22.01 – транспортні системи. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 202 с.
9. Берестов І. В., Пестременко-Скрипка О. С. Удосконалення процедур митного контролю та оформлення міжнародних вантажів при перевезенні залізничним транспортом в умовах цифровізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2(157). С. 45-51. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/05/zhurnal-2_2024.pdf (дата звернення 22.02.2025).

Берестов Ігор В'ячеславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1209-6885. E-mail: i.berestov@i.ua.

Пестременко-Скрипка Оксана Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-5335-5399. Тел.: +38(066)6-410-140. E-mail: ksju2910@gmail.com.

Колісник Аліна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-5038-0230. E-mail: kolisnuk@kart.edu.ua.

Berestov Ihor, PhD (Tech). Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1209-6885. E-mail: i.berestov@i.ua.

Pestremenko-Skrypka Oksana, PhD (Tech). Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-5335-5399. Tel.: +38(066)6-410-140. E-mail: ksju2910@gmail.com.

Kolisnik Alina, PhD (Tech). Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-5038-0230. E-mail: kolisnuk@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 19.03.2025 р.

УДК 656.025.6

СТАЛЕ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЯК ІНТЕГРАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМІНАЛА

Асп. І. М. Ларіна

SUSTAINABLE OPERATION AS AN INTEGRAL CHARACTERISTIC OF THE CONTAINER TERMINAL TECHNOLOGICAL SYSTEM

Postgraduate student I. M. Larina

Анотація. Обґрунтовано, що стале функціонування виробничого підприємства забезпечено сталим функціонуванням його техніко-технологічної системи. Сформульовано основні теоретичні положення щодо визначення сутності, критеріїв та умов сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного термінала як основи сталого функціонування термінала, умов сталого функціонування техніко-технологічної системи підприємства. Визначено компоненти сталого функціонування морського контейнерного термінала та сформовано схему формування пропускної спроможності контейнерного термінала як інтегральної характеристики відповідної техніко-технологічної системи; формалізовано умови сталого функціонування техніко-технологічної системи морського контейнерного термінала на базі відповідної концепції.

Ключові слова: пропускна спроможність, контейнерний термінал, контейнерні перевезення, імовірність, продуктивність обладнання.

Abstract. It is substantiated that the sustainable functioning of a production enterprise is ensured by the sustainable functioning of its technical and technological system. The conditions for the sustainable functioning of the technical and technological system of the enterprise are formulated. Theoretical provisions are developed to determine the essence, criteria and conditions for the sustainable functioning of the technical and technological system of a container terminal as the basis for the sustainable functioning of the terminal. The technical and technological system of a port container terminal consists of a set of technical means (transshipment equipment of various categories) that form technological lines for carrying out cargo operations. The components of the sustainable functioning of a sea container terminal are determined: the required state of the technical and technological system; the availability of resources of the required quantity and quality (energy resources, human resources); the required depth level near the berths; the required technical condition of the berths. A scheme for forming the throughput capacity of a container terminal as an integral characteristic of the corresponding technical and technological system is developed. A mathematical description of the conditions for the sustainable functioning of the technical and technological system of a sea container terminal is performed based on the corresponding concept. The formalization of the conditions for the sustainable functioning of the technical and technological system of enterprises in general and the container terminal in particular is carried out using probability theory under the assumption that the productivity of technological equipment, the throughput of berths and the terminal as a whole are random variables, the level of which is influenced by many factors, both internal and external. The presented results constitute a theoretical basis for the further development of methods and means of ensuring the sustainable functioning of marine container terminals.

Keywords: *capacity, container terminal, container transportation, probability, equipment performance.*

Вступ. Сучасні контейнерні перевезення мають справу з багатьма викликами: автоматизація [1-3], цифровізація [4, 5], екологізація [6], що у свою чергу формує нові виклики та завдання для портів і портових терміналів. Проте вплив зовнішнього середовища [1] і невизначеність контейнеропотоків [7, 8] обґрунтовують необхідність забезпечення сталого функціонування терміналів і портів.

Стале функціонування галузі національної економіки, господарств – це здатність виробляти продукцію в установлених номенклатурі та обсягах за умов негативного впливу зовнішнього середовища. При цьому дуже важливим для країни є наявність у портах і терміналах виробничих ресурсів певного рівня для переробки необхідного обсягу вантажів, що обґрунтовує потребу розглянути питання забезпечення сталого функціонування портових терміналів, зокрема контейнерних. Стале функціонування контейнерних терміналів забезпечує необхідний рівень контейнерної логістики, що є важливим для транспортної галузі країни та конкурентоспроможності українських портів.

Для підприємств, пов'язаних із певною виробничою системою та відповідним комплексом технічних засобів і технологічного обладнання, стале функціонування визначено можливістю забезпечення певного рівня виробничої потужності. Для контейнерних терміналів такою характеристикою є пропускна спроможність терміналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Функціонування системи розглядають по-різному: у сучасній науковій літературі розглядають поняття «ефективне функціонування», «оптимальне функціонування», «безперебійне функціонування» і т. п. Це відповідає основним характеристикам функціонування

системи, до яких належить ефективність, надійність, якість керування, перешкодо- захищеність, стійкість і ступінь складності тощо [9]. «Стале функціонування» є також одним із варіантів розгляду функціонування та пов'язано з такою характеристикою системи, як стійкість.

У сучасній літературі, крім терміна «стале функціонування», використовують також термін «функціональна стійкість». Функціональна стійкість – більш комплексне поняття, яке містить у собі поняття надійності, живучості та відмовостійкості [10]. Аналізуючи джерела, можна зробити висновок, що термін «стале функціонування» є більш узагальнюючим для систем будь-якої природи, характеризуючи таку характеристику функціонування, як стійкість. «Функціональна стійкість» [10-14] є більш конкретним проявом сталого функціонування для технічних (інформаційних) систем. Також слід зазначити, що стале функціонування передбачає будь-який часовий інтервал розгляду та різні впливи; на відміну від функціональної стійкості, що передбачає майже постійний вплив негативних факторів, наприклад погодних умов на технічну систему, та більш близько до надійності [13].

Для інформаційних систем функціональна стійкість стосується властивості системи залишатися працездатною та виконувати свої функції незалежно від різних внутрішніх або зовнішніх впливів, таких як помилки в роботі, несправності обладнання, збої в програмах або кібератаки. Її можна досягнути навіть за умови відмови якоїсь частини обладнання чи складової, головне – збереження працездатності системи й виконання завдань за призначенням [12].

Отже, у більшості сучасних джерел, присвячених сталому функціонуванню,

зазвичай розглядають як об'єкт інформаційні системи (у тому числі керуючі системи як бортові системи літаків і суден [15]). Незважаючи на те, що стале функціонування може бути застосовано для всіх видів систем, для підприємств, виробничих систем це майже не розглядають, але є виключення, наприклад, робота [9], хоча забезпечення необхідних параметрів функціонування є важливим також.

Якщо аналізувати англomовну сучасну літературу з ключовими словами «сталій розвиток» і «стале функціонування» (Sustainable operating, functioning), то сутністю відповідних досліджень є насамперед екологічні питання та питання економії палива, у тому числі в транспортній сфері взагалі та портовій діяльності зокрема, наприклад [16, 17] зменшення шуму та екологічного навантаження на місце та прилеглі території порту визначено як забезпечення сталого функціонування порту [17]. Отже, розглядаючи проблему сталого функціонування, слід взяти до уваги відмінності вітчизняної та зарубіжної термінології. Це пов'язано з рівнем розвитку розглянутих систем. Для розвинутих портів і портових терміналів (які є у Західній Європі) питання надійності технологічного обладнання є цілком технічними питаннями, тому що система організації технічного обслуговування та заміни кранів та іншої техніки є вже сталими та визначеними відповідно до рекомендацій виробника. Тобто йдеться тільки про надійність перевантажувального обладнання певних виробників або обладнання з певними новими технологіями. Крім того, неможливо порівняти виклики та негативний вплив зовнішнього середовища для українських портів та інших європейських портів. Для українських портів і терміналів, навіть довоєнних часів, за умов обмеженості ресурсів впровадження подібних систем не було можливим. Особливо слід зазначити

зовнішні умови та негативний вплив зовнішнього середовища в Україні в довоєнні часи, не говорячи вже про сучасний стан. Отже, можна стверджувати, що питання сталого функціонування контейнерних терміналів потребують наукової уваги з урахуванням запиту практики та практичної відсутності необхідного теоретичного базису.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення теоретичних положень щодо визначення сутності та умов сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу для забезпечення його стійкої роботи в умовах впливу негативних факторів зовнішнього середовища. Досягнення мети передбачає вирішення таких завдань:

- визначення сутності сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу та основних факторів впливу;
- розроблення формалізованого опису умов сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного терміналу.

Основна частина дослідження. Виробнича спроможність будь-яких підприємств пов'язана з відповідною техніко-технологічною системою (іноді використовують термін «техніко-технологічна база» відносно економіки виробництва). За більшістю джерел, потенційна виробнича спроможність підприємства, мірилом якої є його виробнича потужність, переважно залежить від наявної в нього техніко-технологічної бази. В основі забезпечення сталого функціонування контейнерних терміналів, як і інших виробничих підприємств, є стале функціонування його техніко-технологічної системи. Функціонування техніко-технологічної системи забезпечує безпосередньо створення товару/послуги, для контейнерного терміналу – це послуги перевантаження, завантаження та зберігання контейнерів (TEU).

Отже, стає функціонування системи – це можливість забезпечувати задані параметри за умов різного негативного впливу внутрішніх і зовнішніх факторів. Під сталим функціонуванням контейнерного термінала розуміють можливість забезпечувати певний рівень пропускної спроможності (TEU) за умов негативного впливу факторів зовнішнього та внутрішнього середовища.

Введемо такі позначення: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор параметрів функціонування техніко-технологічної системи, $x_1, x_2, \dots, x_n$ – продуктивність окремих технологічних ліній. Набір параметрів $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ визначає основний цільовий показник функціонування техніко-технологічної системи $R(x, t)$. Для контейнерного термінала $R(x, t)$ – це пропускна спроможність (TEU), t – час, який теоретично можна розглядати і як дискретну, і як безперервну величину, але в контексті функціонування термінала більш адекватним, на нашу думку, є дискретний підхід до часу, що більшою мірою відповідає практичному змісту стійкості. Тому $t = 0, 1, 2, \dots, T$, де T – «горизонт» планування діяльності термінала.

Загалом елементи техніко-технологічної системи можуть бути взаємопов'язаними, утворюючи технологічний ланцюжок, і незалежними, виконуючи конкретні операції. Для функціонування техніко-технологічної системи необхідні ресурси (наприклад електроенергія, паливо тощо), від якості яких, зокрема, залежать параметри техніко-технологічної системи $x_1, x_2, \dots, x_n$ і результат її функціонування – $R(x, t)$. Наприклад, неякісне паливо для технічних засобів може призвести до зниження продуктивності, поломок, простоїв. Перебої з електроенергією, людський фактор також

призводять до зниження певних параметрів функціонування техніко-технологічної системи. Крім того, природне зношування, старіння та якість обладнання теж впливають на взаємозв'язок параметрів $x_1, x_2, \dots, x_n$ і показника $R(x, t)$. Як фактори впливу зовнішнього середовища на техніко-технологічну систему термінала слід відзначити природно-кліматичні та техногенні фактори. Погодні умови (наприклад сильні морські вітри, вологість тощо) також впливають на технічний стан обладнання, його надійність. Отже, усі фактори, що впливають, можуть бути традиційно поділені на дві категорії – зовнішні і внутрішні (рис. 1).

Фактори зовнішнього середовища, зазначені вище, знаходяться поза компетенцією підприємства, але для подолання їхнього негативного впливу потрібна розроблена система заходів – система управління ризиками в технічному аспекті та необхідні резерви ресурсів для їх реалізації. Слід зазначити, що техногенні та природно-кліматичні фактори впливають безпосередньо на техніко-технологічну систему, у той час як інші фактори макросередовища – політичні, економічні, а також ринкові – впливають насамперед на економічну систему підприємства. Проте, як продемонстрували події під час війни з дефіцитом палива та електроенергії, такі ситуації є проявом впливу економіко-політичних факторів, але ж вони також є причиною неможливості здійснення виробничих процесів і зменшення виробничої потужності підприємств. Тому не тільки якість ресурсів, а і наявність їх є фактором впливу на стає функціонування техніко-технологічної системи підприємства.

Техніко-технологічна система контейнерного термінала складається з сукупності технічних засобів (перевантажувального обладнання різних категорій), які формують технологічні лінії для проведення вантажних робіт.

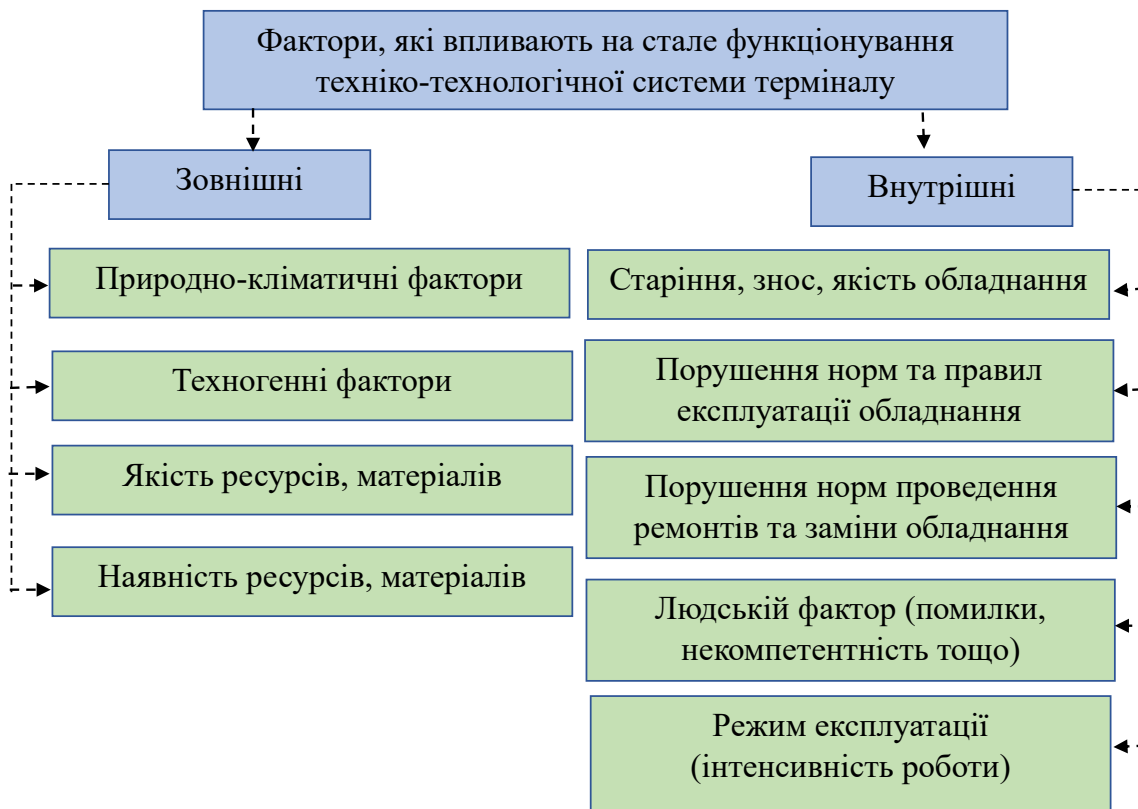


Рис. 1. Фактори, що впливають на стійкість функціонування техніко-технологічної системи терміналу

Забезпечення необхідного рівня пропускної спроможності (TEU) є сутністю сталого функціонування для контейнерного терміналу. Враховуючи специфіку контейнерних терміналів, можна вважати, що основними складовими їхнього сталого функціонування є необхідний стан техніко-технологічної системи; наявність ресурсів

необхідної кількості та якості (енергоресурси, людські ресурси); необхідний рівень глибин біля причалів (якщо йдеться про морський термінал); необхідний технічний стан причалів.

Отже, пропонуємо такий вираз умови сталого функціонування терміналу:

$$P(|R'(t) - R^f(x^f, t)| \leq \Delta R'(t)) \geq p_\alpha, t = 1, 2, 3, \dots, T, \quad (1)$$

де R^f – фактичний показник функціонування за фактичних параметрів техніко-технологічної системи $x^f(t) = (x^f_1(t), x^f_2(t), \dots, x^f_n(t))$;

R' – заданий рівень показника функціонування, який розраховано для $x'(t) = (x'_1(t), x'_2(t), \dots, x'_n(t))$ – планового рівня параметрів техніко-технологічної системи;

$\Delta R'$ – допустиме відхилення від заданого рівня функціонування;

P_α – мінімальна ймовірність, за якої має виконуватися $|R'(t) - R^f(x^f, t)| \leq \Delta R'(t)$.

Слід зазначити, що допустиме відхилення $\Delta R'$ встановлено на базі аналізу середнього рівня «завантаження» термінала та планової пропускної спроможності. Зазвичай обсяги контейнеропотоків, які проходять через термінал (TEU), нижче, ніж R' , і можуть значно коливатися з урахуванням, наприклад, сезонності в перевезеннях деяких вантажів. Тому забезпечення умови (1), тобто певне відхилення фактичної пропускної спроможності R^f (TEU) від R' не призведе до проблем із переробкою контейнерів на терміналі, якщо рівень $\Delta R'$ обґрунтовано з урахуванням також і прогнозів контейнеропотоків. Наприклад, якщо пропускна спроможність термінала $R'_i = 500$ тис. TEU, то з урахуванням фактичного контейнеропотоку на рівні 380-430 тис. TEU рівень $R^f_i = 450$ тис. TEU задовольняє вимоги сталого функціонування.

Декомпозиція пропускної спроможності контейнерного термінала дає змогу подати її формування у вигляді схеми на рис. 2.

Пропускна спроможність, наприклад, морського термінала $R(X, t)$ сформована як поєднання продуктивності (пропускної спроможності) технологічного обладнання причалів (TEU):

$$R(X, t) = \sum_{i=1}^n R_i(x_i, t), \quad (2)$$

де $R_i(x_i, t), i = \overline{1, n}$ – пропускна спроможність (продуктивність технологічного обладнання) i -го причалу (TEU);

$x_i, i = \overline{1, n}$ – параметри, які характеризують продуктивність технологічного обладнання причалу;

$X = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ – параметри, які характеризують елементи техніко-технологічної системи термінала – складові технологічного обладнання.

У свою чергу продуктивність технологічного обладнання причалів залежить від продуктивності відповідного технологічного устаткування:

$$R_i(x_i, t) = C_i(x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)), \quad (3)$$

де C_i – функція, яка описує залежність пропускної спроможності i -го причалу контейнерного термінала від продуктивності складу технологічного обладнання та устаткування;

M_i – кількість обладнання на i -му причалі;

$x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)$ – продуктивність технологічного устаткування причалу.

Існують різні варіанти формалізації залежності пропускної спроможності причалу від параметрів устаткування. Формула (2) описує узагальнення без конкретизації.

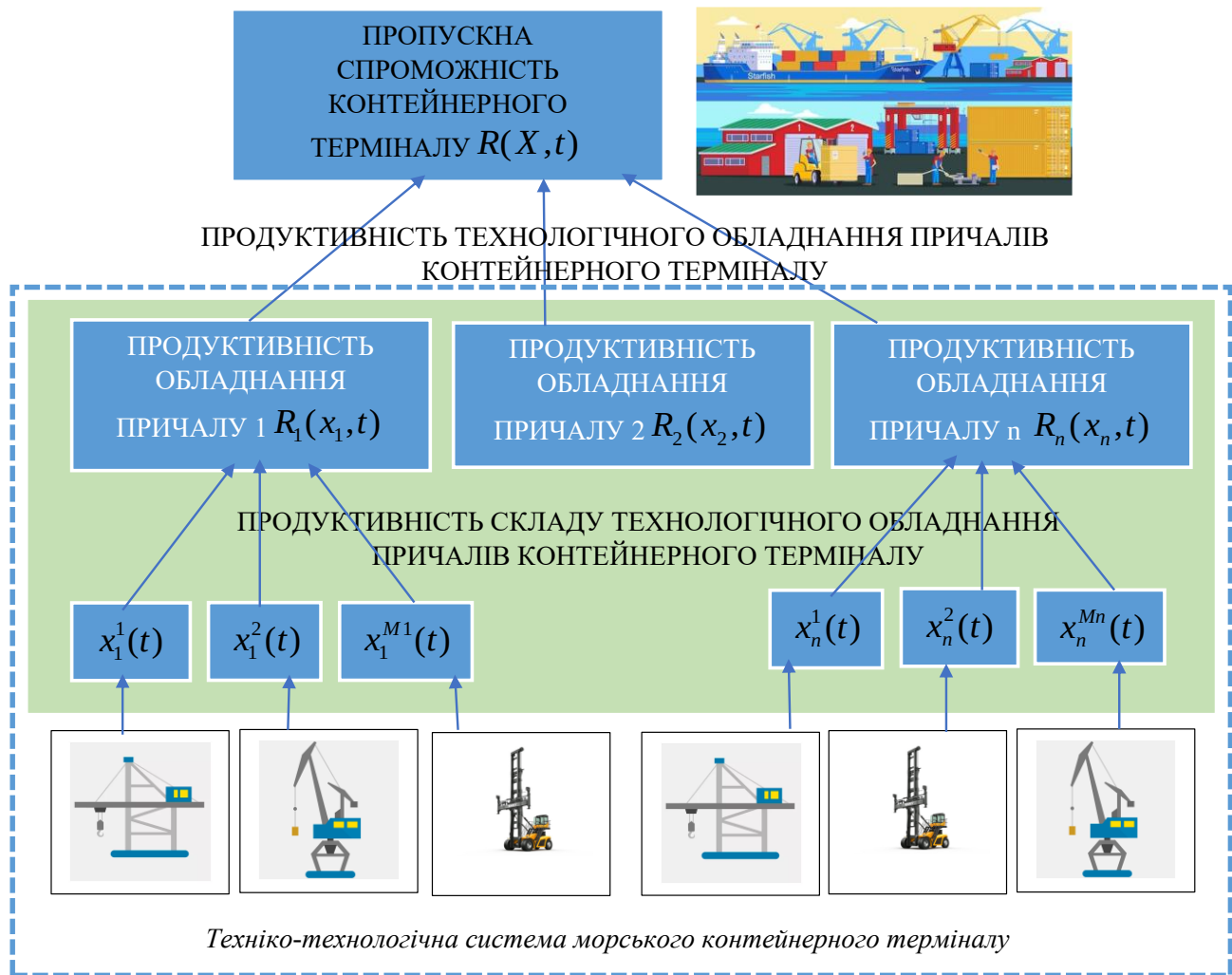


Рис. 2. Пропускна спроможність контейнерного терміналу як інтегральна характеристика відповідної техніко-технологічної системи

Проте, наприклад, у практиці портової діяльності використовують таку формулу для визначення пропускної спроможності i -го причалу:

$$R_i(x_i, t) = \frac{Q_i}{\frac{Q_i}{\bar{P}_i \cdot N_i} + t_{don}} \cdot T_p, \quad (4)$$

де Q_i – середнє завантаження судна, т;

$\bar{P}_i$ – середньозважена продуктивність технологічних ліній за прямим і складським варіантом, т/доба;

N_i – кількість технологічних ліній;

t_{don} – тривалість допоміжних операцій по судну, діб, які неможливо поєднати з вантажними роботами;

T_p – період, що розглядають, р. (діб).

У формулі (4) $\bar{P}_i$ визначено через $x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)$ залежно від складу технологічних ліній, типу обладнання тощо.

Певний вигляд формули (3) не є предметом дослідження, тому в подальшому приймаємо узагальнений вигляд. Отже, сукупність параметрів

$\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}$ визначає пропускну спроможність контейнерного термінала.

З урахуванням викладеного вище шляхом декомпозиції отримаємо такі умови сталого функціонування портового контейнерного термінала як техніко-технологічної системи:

$$P(|R'_i(x'_i, t) - R^f_i(x^f_i, t)| \leq \Delta R'_i(t)) \geq p_{\gamma i}, i = \overline{1, n}, t = 1, 2, 3, \dots, T, \quad (5)$$

де $R'_i, \Delta R'_i$ – відповідно планова продуктивність (пропускна спроможність) і її припустиме зменшення для i -го причалу;
 R^f_i – фактична пропускна спроможність.

Умови (5) інтерпретують так: у кожний момент часу ймовірність того, що пропускна спроможність причалу термінала вище, ніж певний рівень $p_{\gamma i}$, який можна вважати достатнім для забезпечення сталого функціонування.

Отже,

$$\begin{aligned} P(|R'(X', t) - R^f(X^f, t)| \leq \Delta R'(t)) &= \\ &= \prod_{i=1}^n P(|R'_i(x'_i, t) - R^f_i(x^f_i, t)| \leq \Delta R'_i(t)) \geq \prod_{i=1}^n p_{\gamma i} \geq p_{\alpha}, \quad (6) \\ i &= \overline{1, n}, t = 1, 2, 3, \dots, T. \end{aligned}$$

Слід зазначити, що $\sum_{i=1}^n \Delta R'_i(t) = \Delta R'(t)$ з урахуванням того, що пропускна спроможність термінала визначена як сума пропускних спроможностей причалів.

У свою чергу забезпечення виконання умов (5) і (6) потребує виконання аналогічних умов для параметрів, які характеризують продуктивність кожного елемента зі складу техніко-технологічного обладнання кожного причалу.

Головну роль для забезпечення певного рівня продуктивності технологічних комплексів причалів відіграють портальні контейнерні перевантажувачі, тому що саме вони

здійснюють безпосередньо процес розвантаження/навантаження суден. Інше обладнання та устаткування підлягає перерозподілу між причалами, тому, якщо для окремих їхніх елементів порушено стале функціонування, це зазвичай не призводить до порушення сталого функціонування технологічного комплексу причалу і термінала в цілому. Тому для забезпечення виконання умови (6) насамперед необхідним є забезпечення сталого функціонування портальних контейнерних перевантажувачів.

З урахуванням цього факту умови сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного термінала слід звизити, не розглядаючи всі елементи, а тільки основні, у нашому

випадку – причальних контейнерних перевантажувачів. Нехай серед елементів

множини $\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}$

виділено підмножину параметрів, які характеризують продуктивність порталних контейнерних перевантажувачів. Не обмежуючи загальності, приймаємо

$$\bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{L_i}(t)\} \subset \bigcup_{i=1}^n \{x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^{M_i}(t)\}, \quad (7)$$

де $L_i, i = \overline{1, n}$ – кількість причальних контейнерних перевантажувачів i -го причалу.

До цієї множини також можна додати ще тилові контейнерні перевантажувачі, якщо вони для такого термінала відіграють також важливу роль і досить сильно впливають на пропускну спроможність термінала. У будь-якому випадку стале функціонування термінала на практиці залежить не від усіх складових техніко-

технологічної системи, а тільки її підмножини, яку необхідно визначити з урахування особливості термінала. У такому разі можна сформулювати схему, як на рис. 3, на базі рис. 2, яка відображує концепцію формування множини умов сталого функціонування техніко-технологічної системи морського контейнерного термінала.

Отже, для кожного з основного устаткування наступні умови є умовами сталого функціонування:

$$P(|x_i^{rk}(t) - x_i^{fk}(t)| \leq \Delta x_i^{rk}(t)) \geq p_{ik}, k = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}, t = 1, 2, \dots, T, \quad (8)$$

де $x_i^{rk}(t)$ – планова продуктивність k -го устаткування з множини основних;

$x_i^{fk}(t)$ – фактична продуктивність k -го устаткування з множини основних;

$\Delta x_i^{rk}(t)$ – припустиме відхилення фактичної продуктивності k -го устаткування з множини основних від запланованого рівня;

p_{ik} – імовірність забезпечення необхідного рівня продуктивності.

Слід зазначити, що визначення $\Delta x_i^{rk}(t)$ потребує окремого дослідження з урахуванням типу обладнання.

Отже, виконання умови (8) обумовлює виконання умови (6), що у свою чергу обумовлює виконання умови (1).

Слід зазначити, що коли визначають продуктивність устаткування $x_i^{rk}(t)$ (наприклад порталних перевантажувачів), то зазвичай не розглядають їх використання протягом 24 годин за добу, отже приймають коефіцієнт використання на рівні 0,7-0,8, що формує певний запас продуктивності та, як наслідок, запас пропускну спроможності технологічних комплексів причалів і термінала в цілому.

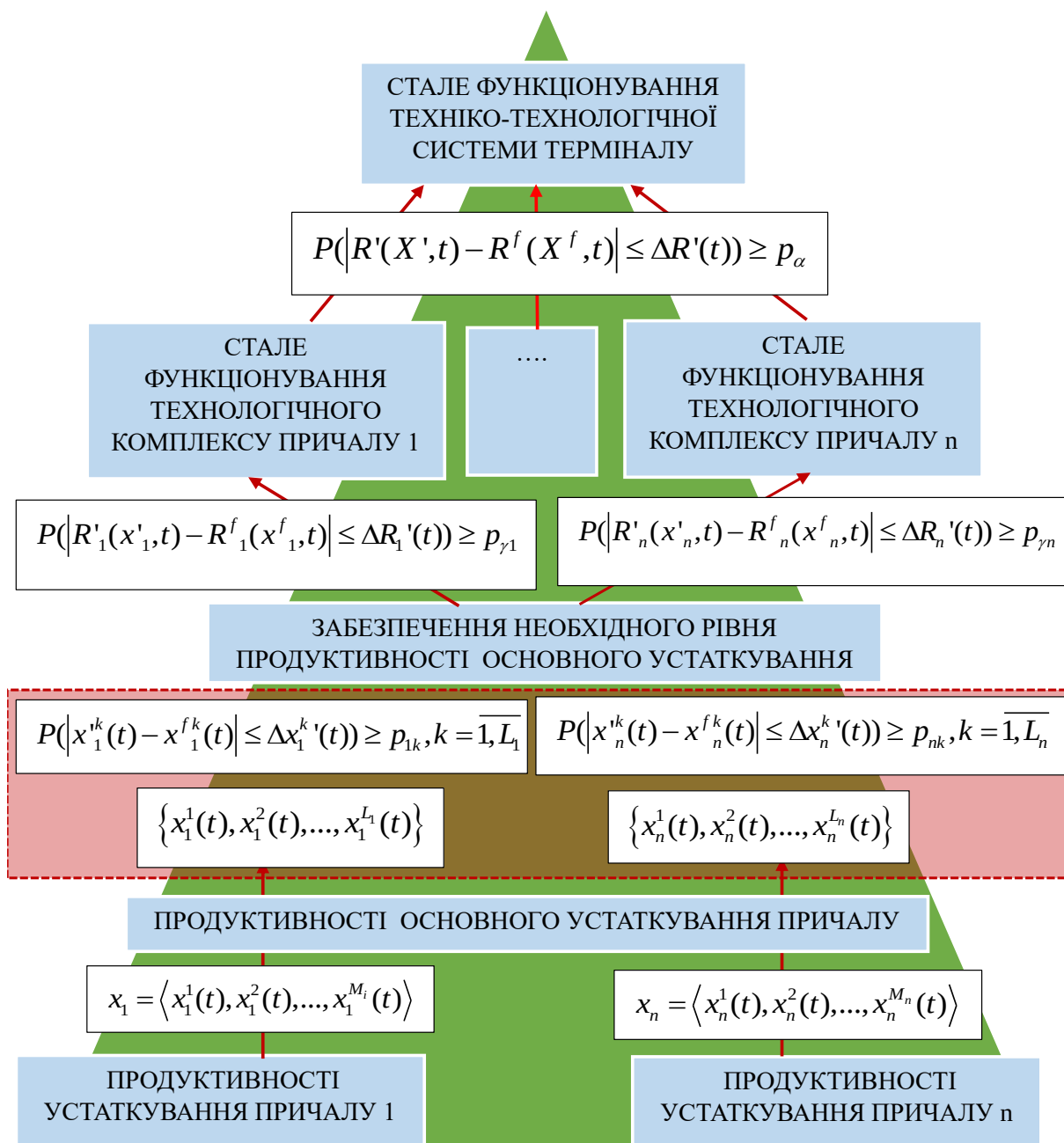


Рис. 3. Концепція формування множини умов сталого функціонування техніко-технологічної системи морського контейнерного термінала

Висновки. У дослідженні сформульовано основні теоретичні положення щодо визначення сутності та умов сталого функціонування техніко-технологічної системи контейнерного

термінала як основи сталого функціонування термінала в цілому.

Встановлено, що стале функціонування контейнерного термінала – це можливість забезпечувати певний рівень

пропускної спроможності (TEU) за умов негативного впливу факторів зовнішнього та внутрішнього середовища.

Встановлено фактори впливу на стале функціонування терміналу: природно-кліматичні, техногенні, наявність і якість ресурсів, старіння та знос техніки, порушення норм і правил експлуатації та обслуговування, людські помилки.

Визначено схему формування пропускної спроможності контейнерного терміналу як інтегральної характеристики відповідної техніко-технологічної системи. На її базі сформульовано умови сталого функціонування відповідно до послідовності «продуктивність устаткування причалів – пропускна спроможність причалів – пропускна спроможність терміналу».

Формалізацію умов сталого функціонування техніко-технологічної

системи контейнерного терміналу здійснено з використанням теорії ймовірностей з припущенням, що продуктивність технологічного обладнання, пропускна спроможність причалів і терміналу в цілому є випадковими величинами, на рівень яких впливає безліч внутрішніх і зовнішніх факторів.

Слід зазначити, що хоча в дослідженні спиралися на врахування структури морських контейнерних терміналів, проте отримані результати можуть бути адаптовані до структури та специфіки інших терміналів, що обґрунтовує їхню універсальність.

Викладені результати складають теоретичну базу для подальшого розроблення методів і засобів забезпечення сталого функціонування контейнерних терміналів.

Список використаних джерел

1. Kyryllova O., Kyryllova V. Theoretical foundations of spatial and functional evolution of ports. *Транспортні системи і технології*. 2022. 1. 170-189. DOI: 10.32703/2617-9040-2022-40-15.
2. Решетков Д. М., Онищенко С. П., Павлова Н. Л., Кириллова В. Ю. Сутність, переваги та проблеми автоматизації контейнерних терміналів морських портів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34 (73), № 2. С. 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/33.
3. Kon W. K., Rahman N. S., Hanafiah R. M., Hamid S. A. The global trends of automated container terminal: A systematic literature review. *Maritime Business Review*. 2020. 6. P. 206–233
4. Melnyk O., Onyshchenko S., Pavlova N., Kravchenko O., Borovyk S. Integrated Ship Cybersecurity Management as a Part of Maritime Safety and Security System. *IJCSNS*. 2022. 22(3). 135. DOI: 10.22937/IJCSNS.2022.22.3.18.
5. Решетков Д. М., Бондарюк М. А., Онищенко С. П. Сутність, переваги та існуючий досвід розвитку розумних портів. *Розвиток транспорту*. 2022. № 4 (15). 108–122. DOI: 10.33082/td.2022.4-15.09.
6. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. 116. DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14.
7. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 1. С. 139-146.

8. Берестенко В., Онищенко С. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. Vol. 1(12). Р. 118-128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10.
9. Гнатієнко О., Дружинін В. Сучасні тенденції забезпечення функціональної стійкості складних організаційних систем. *Управління розвитком складних систем*. 2025. (60). 13–17. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.13-17.
10. Висоцька І. Б. Теоретичні підходи до поняття «стійкість системи». *Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ. Серія економічна*. 2017. Вип. 2. С. 13-23.
11. Mogylevych D., Sboiev R. Analysis of functional safety of electronic communication system equipment. *Collection Information technology and security*. 2023. N 11. 96-105. DOI: 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283816.
12. Функціональна стійкість технологічних процесів на основі нелінійної динаміки із застосуванням нейромереж / В. В. Собчук [та ін.]. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, № 2. С. 49-57.
13. Барабаш О., Макачук А., Саланда І. Дослідження ймовірнісного показника функціональної стійкості розподілених інформаційних систем. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. N 1. С. 45–50. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-6.
14. Собчук В. В., Барабаш О. В., Мусієнко А. П. Основи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем підприємств в умовах впливу дестабілізуючих факторів: монографія. Київ: Міленіум, 2022. 272 с.
15. Калашник Г., Калашник-Рибалко М. Ознаки та критерії функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання сучасного повітряного судна та перспективні напрямки його розвитку. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. С. 7-15. DOI: 10.30748/zhups.2021.68.01.
16. Haraldson Sandra & Lind Mikael & Raza Zeeshan & Woxenius Johan & Olindersson Fredrik. The concept of the sustainable port - ports becoming enablers of sustainability in transports and logistics. 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.35250.99526.
17. Hossain Tahazzud & Adams Michelle & Walker Tony. Role of sustainability in global seaports. *Ocean & Coastal Management*. 2021. 202. DOI: 105435. 10.1016/j.ocecoaman.2020.105435.

Ларіна Ірина Миколаївна, PhD здобувач кафедри експлуатації портів і технологій вантажних робіт Одеського національного морського університету. ORCID iD: 0009-0005-1169-7223. Тел.: +38 (063) 317-69-05. E-mail: ivanovain92@gmail.com

Larina Iryna, Phd applicant, department of Port Operations and Handling Technology, Odesa National Maritime University. ORCID iD: 0009-0005-1169-7223. Tel. +38 (063) 317-69-05. E-mail: ivanovain92@gmail.com

Статтю прийнято 25.03.2025 р.

УДК 656.225

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАВАННЯ КОНТЕЙНЕРОПОТОКУ ІЗ ЗЕРНОВИМИ ВАНТАЖАМИ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗА УЧАСТЮ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Д-р техн. наук Д. В. Ломотко, канд. техн. наук В. М. Ільчишин,
д-р філос. М. Д. Ломотко, асп. О. Ф. Афанасова

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR TRANSFER CONTAINER FLOW WITH GRAIN CARGO WHEN TRANSPORTED BY RAILWAY

Dr. Sc. (Tech.) D. V. Lomotko, Cand. Tech. Sc. V. M. Ilchyshyn,
PhD M. D. Lomotko, Postgraduate Student O. F. Afanasova

Анотація. Проаналізовано статистичні дані, що показало, що логістична система держави пристосувалася до умов воєнного стану, і протягом останніх двох років спостерігається стабільне щорічне зростання обсягів перевезень контейнерних вантажів на 30 %. Частка експортних логістичних ланцюгів, де задіяні сухопутні прикордонні переходи, досягла 64 %, що актуалізує проблему взаємодії суміжних видів транспорту.

Сучасною тенденцією є перевезення зернових вантажів у контейнерах: у 2021 році частка зернових становила 8 %, а у 2024 році зросла до 39 % загального контейнерообігу. Встановлено, що сукупна потреба в переробці контейнерів на сухопутних міждержавних переходах у середньому становить 47 % наявної переробної спроможності прикордонних контейнерних терміналів. З метою зменшення черг на прикордонних переходах із вагонів, завантажених зерновими вантажами, запропоновано частину зернового вантажопотоку перевозити в контейнерах.

Дослідження особливості функціонування прикордонного контейнерного зернового терміналу показали, що, незалежно від його типу, існують аналогічні за технологією обробки контейнерів функціональні ділянки. Їхня відмінність полягає лише в переробній спроможності функціональних ділянок, що визначена місткістю транспортних засобів із зерном, кількістю залученої техніки та корисною площею терміналу.

Недостатня переробна спроможність прикордонних зернових контейнерних терміналів зумовлює формування черг із транспортних засобів, що призводить до фінансових втрат. Проаналізовано складові непродуктивного простою транспортних засобів. Доведено, що технологічний варіант перевезення зернового вантажу в контейнерах є економічно вигіднішим, ніж варіанти перевезення автотранспортом і у вагонах-зерновозах ЦТЛ у сезон. Для перевезення зерна у власних вагонах-зерновозах і вагонах ЦТЛ у міжсезоння контейнерний варіант перевезення є вигідним за тривалості очікування в черзі до п'яти діб. Застосування запропонованих підходів передбачено удосконалити шляхом урахування стохастичної природи технологічних параметрів і використати як систему підтримки ухвалення рішень оперативних працівників і логістів.

Ключові слова: залізничний транспорт, морський транспорт, автотранспорт, зернові вантажі, взаємодія, контейнер, термінал.

Abstract. A statistical analysis was conducted, which showed that the state's logistics system has adapted to the conditions of martial law and over the past two years there has been a stable

annual growth in container cargo transportation by 30 %. The share of export logistics chains involving land border crossings has reached 64 %, which makes the problem of interaction between adjacent modes of transport relevant.

The current trend is the transportation of grain cargo in containers: in 2021, the share of grain was 8 %, and in 2024 it increased to 39 % of the total container turnover. It was established that the total need for container processing at land interstate crossings is on average 47 % of the available processing capacity of border container terminals. In order to reduce queues at border crossings from wagons loaded with grain cargo, it was proposed to transport part of the grain cargo flow in containers.

Studies of the peculiarities of the functioning of the border container grain terminal showed that, regardless of its type, there are functional areas similar in terms of container processing technology. Their difference lies only in the processing capacity of functional areas, which is determined by the capacity of vehicles with grain, the number of equipment involved and the useful area of the terminal.

Insufficient processing capacity of border grain container terminals leads to the formation of queues of vehicles, which leads to financial losses. The components of unproductive downtime of vehicles have been analyzed. It has been proven that the technological option of transporting grain cargo in containers is more economically advantageous than the options for transportation by road and in grain wagons of the CTL in season. When transporting grain in its own grain wagons and in CTL wagons in the off-season, the container transportation option is advantageous when the waiting time in the queue is up to 5 days. The application of the proposed approaches is expected to be improved by taking into account the stochastic nature of technological parameters, and used as a decision support system for operational workers and logisticians.

Keywords: railway transport, sea transport, motor transport, grain cargo, interaction, container, terminal.

Вступ. Останнім часом у системах доставки вантажів ефективно застосовують мультимодальні перевезення, тобто перевезення різними видами транспорту. Ця технологія особливо приваблива для перевезення вантажів у міжнародному сполученні. У цих логістичних ланцюгах важливу роль відіграють пункти передавання вантажопотоків з одного виду транспорту на інший, оскільки транспортні системи різних країн часто є слабо інтегрованими між собою. З іншого боку, світова тенденція до зростання обсягів контейнерних перевезень, нестача спеціалізованого рухомого складу для перевезення зернових вантажів і великі черги на сухопутних прикордонних залізничних станціях з початком введення в Україні воєнного стану, створюють передумови для більш широкого застосування технології перевезень зернових вантажів у контейнерах [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження у сфері перевезень контейнерів і зернових вантажів із використанням залізничного транспорту переважно присвячені оптимізації технології логістичних потоків для інтермодальних вантажних перевезень.

Дослідження [2] спрямовано на удосконалення моделі управління процесами формування контейнерних поїздів і забезпечення своєчасного доставлення в морський порт. Авторами запропоновано модель, що враховує особливості взаємодії різних видів транспорту разом із портовими терміналами, залізничними станціями та судновими операторами. Особливістю моделі є ймовірнісні складові, пов'язані з процесом накопичення контейнерів і їх просування до порту. Сформульовано оптимальні умови формування контейнерних поїздів, що покладено в

основу системи підтримки прийняття рішень (СППР) у сфері управління доставленням контейнерів до порту.

У публікації [3] розглянуто операції перевалки вантажів у залізничних терміналах морських портів. Автори пропонують оптимізаційну модель, яка дає змогу визначити умови зменшення часу зберігання контейнерів, за рахунок чого покращуються показники ефективності перевалки контейнерів. Але у статті відсутні зазначення конкретних параметрів доступу до логістичної інфраструктури. Стаття [4] присвячена проблемі інтеграції магістрального транспорту в портову зону, для чого запропоновано оптимізаційну модель міжтермінального переміщення контейнерів і транспортних засобів.

У статті [5] розглянуто особливості створення ланцюга постачання вантажів у контейнерах на основі застосування концепції «зеленої» логістики. Встановлено, що мультимодальні технології мають менший негативний вплив на довкілля, доведено, що впровадження «зелених» технологій доставлення контейнерів ефективно на відстань більше 300 км саме за участю залізниці. Додатковий ефект у вигляді удосконаленого екологічного критерію для контейнерного перевезення залізницею та автотранспортом автори дослідження [6] запропонували розраховувати як вартісну величину шкоди від негативного впливу двооксиду вуглецю на атмосферне повітря.

У роботі [7] сформовано оптимізаційну математичну модель із використанням апарату ризик-менеджменту, яка відображує процес просування ступінчастих «зернових» потягів з елеваторів в Україні через сухопутні західні кордони до морських портів ЄС, де розташовано зернові термінали. З формуванням оптимізаційної математичної моделі функціонування такого транспортно-логістичного ланцюга прийнято, що фактор ризику є технологічним, тобто показує невиконання

строків проведення сукупності технологічних операцій із вантажем (зерном) у процесі його переміщення, тоді подією буде невиконання строків доставлення вагонів із зерном на термінал у порти, а наслідком – додаткові економічні витрати.

У межах логістичного ланцюга для перевезення зернових вантажів залізниця виконує додаткові технологічні операції, спрямовані на дотримання строку доставлення, рівня схоронності та умов зберігання вантажу. Ці питання розглянуто і формалізовано [8] як модель, яка відтворює технологію доставлення зернових вантажів залізницею із застосуванням ступінчастих маршрутів.

Стаття [9] присвячена оптимізації плану роботи інтермодальних терміналів з урахуванням численних невизначеностей (погодні умови, зміни розкладів транспортних засобів, поломки обладнання тощо). Авторами використано двоетапну оптимізацію на базі пакета AnyLogic, зокрема розроблено гібридні моделі динаміки для оцінювання ефективності впровадження сухих портів.

Перевагами розглянутих досліджень є комплексний підхід для оцінювання технології доставлення вантажів у контейнерах, сучасні підходи для її моделювання та надання інструментарію для покращення процесу ухвалення технологічних рішень. Але недостатнє врахування можливих технологічних сценаріїв, зокрема у випадку інтермодального перевезення зернових вантажів за участю залізниці в умовах невизначеності, потребує подальших досліджень та уточнення.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є дослідження особливостей технології передавання контейнеропотоку із зерновими вантажами для перевезення за участю залізничного транспорту.

Для досягнення цієї мети запропоновано дослідити динаміку змін перевезень вантажів у контейнерах за

обсягами та номенклатурою; розглянути технологічні особливості роботи прикордонного контейнерного зернового терміналу як частини логістичного ланцюга за участю залізниці; дослідити складові збитків від непродуктивного простою транспортних засобів на прикордонному контейнерному зерновому терміналі та в очікуванні подавання на нього.

Основна частина. В останні роки спостерігають суттєве зростання зовнішньоторговельних вантажо- та контейнеропотоків, незважаючи на введення воєнного стану в Україні. Зокрема, обсяги експорту вантажів за 2024 рік мають таку структуру: зернові вантажі 34,1 млн т (40 %), руда залізна і марганцева 33 млн т (39 %), чорні метали 5,2 млн т (6 %), мінбудматеріали 4,3 млн т (5 %).

За останні сім років в Україні було перевезено 1,7 млн TEU. Динаміку змін загальних обсягів перевезень завантажених контейнерів наведено на рис. 1. Аналіз показує, що після значного падіння обсягів перевезень після початку активних бойових дій на території України у 2022 році логістична система країни адаптувалася до змін, тому останні два роки обсяги перевезень контейнерних вантажів стабільно зростають.

Якщо розглянути структуру контейнерних перевезень за видами сполучень, то основна тенденція пов'язана із суттєвим скороченням обсягів перевезень контейнерів у транзитному сполученні та зростанням внутрішніх та експортних контейнерних перевезень (табл. 1 [10]).

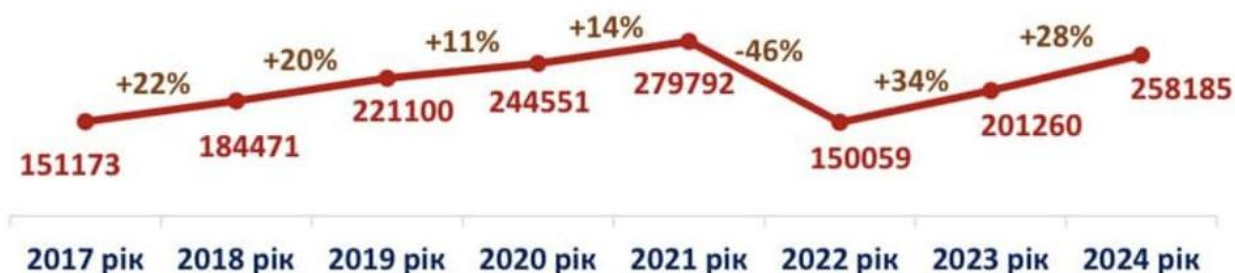


Рис. 1. Динаміка змін загальних обсягів перевезень завантажених контейнерів, TEU

Таблиця 1

Структура контейнерних перевезень за видами сполучення

Сполу-чення	2021 рік		2022 рік		2023 рік		2024 рік		У % до 2021 р.
	TEU	Частка	TEU	Частка	TEU	Частка	TEU	Частка	
РАЗОМ	279792	100 %	150059	100 %	201260	100 %	258185	100 %	92 %
Імпорт	57670	21 %	29284	20 %	37082	18 %	55589	22 %	96 %
Експорт	153559	55 %	86870	58 %	124949	62 %	162725	63 %	106 %
Внутрішнє	23516	8 %	29834	20 %	38385	19 %	38681	15 %	164 %
Транзит	45048	16 %	4072	3 %	844	0,4 %	1190	0,5 %	3 %

При цьому в експортних перевезеннях вантажів у контейнерах у 2024 році частка логістичних ланцюгів за участю портів складає 36 %, а 64 % (або 104 тис. TEU/р., що складає в середньому 285 TEU/доба) експортних перевезень контейнерів прямувало через сухопутні прикордонні переходи. Це гостріше позначає проблеми у сфері взаємодії суміжних видів транспорту. Виникають простої вагонів і суден, що ведуть до збитків, різні системи стандартів призводять до надмірного збільшення кількості паперових документів, тривала процедура оформлення міжнародних

залізничних, залізнично-водних і залізнично-автомобільних перевезень експортних та імпорتنних вантажів веде до збитків від простою транспортних засобів на прикордонних терміналах і зниження конкурентоспроможності залізничного транспорту. Недостатня ємність і оснащеність прикордонних сухопутних і морських вантажних терміналів також негативно впливає на ефективність роботи суміжних видів транспорту.

Динаміку перевезень основної номенклатури вантажів у контейнерах за останні сім років наведено на рис. 2.

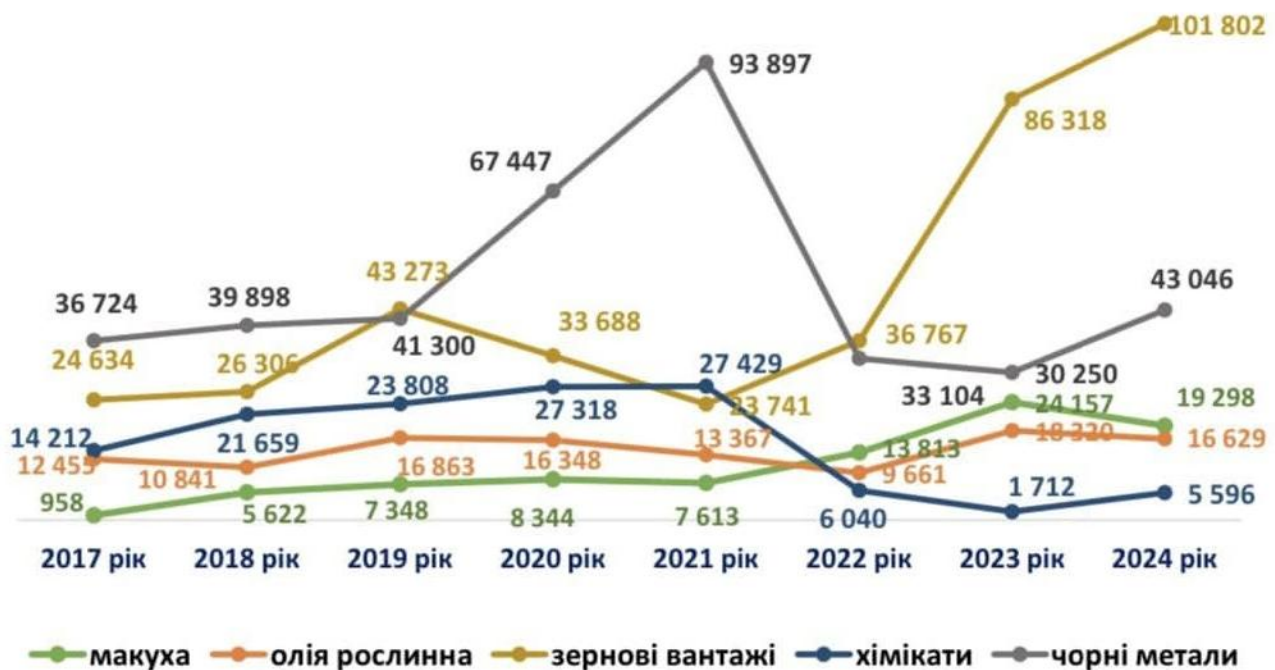


Рис. 2. Динаміка перевезень основної номенклатури вантажів у контейнерах, TEU

Аналіз показує, що частка зернових вантажів у загальному контейнерообігу має стабільну тенденцію до зростання: якщо у 2021 році вона складала 8 %, то у 2024 році склала 39 % загального обсягу. Отже, питання удосконалення технології перевезення та передавання зернових вантажів у контейнерах стає більш важливим, особливо для наземних видів транспорту.

Експортери зерна переважно використовують три основні залізничні термінали на західному кордоні: Ізов (Польща), Ужгород (Словаччина) і Чоп (Словаччина, Угорщина) [11]. Але сухопутних прикордонних терміналів більше: на кордоні з Польщею діють зернові термінали на прикордонних переходах Мостиська-2, Яготин, Ізов, експортувати

зерно в Румунію можна з переходів Дяково-2, Вадул-Сірет, до Молдови зернові відправляють на прикордонних переходах Могилів-Подільський, з якого можна організувати відвантаження вантажів у

порту Рені, а також Рені-Джурджулешти, а Словаччина приймає зернові вантажі на переходах станцій Ужгород і Чоп. Загальну переробну спроможність переходів зведено до табл. 2.

Таблиця 2

Загальна переробна спроможність основних прикордонних терміналів

Прикордонний перехід	Перевантаження зернових вантажів на прикордонних станціях			Перевантаження контейнерів на прикордонних станціях		
	Наявна переробна спроможність, ваг/доба	Додаткова переробна спроможність, ваг/доба	Загальна переробна спроможність, ваг/доба	Наявна переробна спроможність, ваг/доба	Додаткова переробна спроможність, ваг/доба	Загальна переробна спроможність, ваг/доба
Мостиська-Медика (Польща)	50	150	200	145	60	205
Ягодин-Дорохуськ (Польща)	120	50	170	-	-	-
Ізов-Хрубешів (Польща)	130	-	130	130	-	130
Разом Польща	300	200	500	275	60	335
Вадул-Сірет – Дорнешти (Румунія)	20	30	50	45	45	90
Дяково – Халмеу (Румунія)	30	120	150	-	-	-
Разом Румунія	50	150	200	45	45	90
Чоп — Чірна над Тисоу (Словаччина)	75	310	385	225	25	250
Чоп – Захонь (Угорщина)	95	310	405	265	25	290
Разом	520	970	1490	810	155	965

За перші місяці 2025 року середньодобове фактичне передавання зернових вантажів у вагонах по сухопутних переходах склала 178 ваг/доба. Черга з вагонів із зерновими вантажами за той самий період складала від 74 до 208 ваг/доба, середній час

очікування – чотири доби. Це відбувається в умовах, коли в напрямку портів експортують 92 % (31,4 млн т/р.) загального обсягу зернових, а через західні сухопутні прикордонні переходи — 8 % (2,7 млн т/р., або в середньому 7,5 тис. т/доба).

Аналіз показує, що в експортному сполученні середньодобова потреба в переробці контейнерів на сухопутних переходах (без урахування країни призначення) складає 285 TEU/доба, в імпортному – 98 TEU/доба. Отже, загальна потреба в переробці контейнерів складає в середньому 383 TEU/доба, або 47 % наявної переробної спроможності прикордонних контейнерних терміналів. Як варіант вирішення проблеми черг на прикордонних переходах із вагонів, звантажених зерновими вантажами, запропоновано частину цього вантажопотоку перевозити в контейнерах.

Дослідження транспортних процесів показують, що нерівномірність зернових транспортних потоків – явище об'єктивне, зумовлене множиною факторів [2, 12]. Правильно спрогнозувати обсяги з урахуванням впливу багатьох факторів на транспортний процес дуже складно. Основними причинами невисокої частки

міжнародних зернових контейнерних перевезень, що припадають на залізницю, є недоліки у взаємодії залізничного та інших видів транспорту. Передавання вантажів за участю залізничного транспорту супроводжується тривалим оформленням факту перевалки, низьким (порівняно із західними показниками) рівнем автоматизації обробки та передавання інформації, складністю виконання операцій із підтримки належного рівня вологості зерна та фітосанітарного контролю тощо. Тож слід зробити висновок про необхідність розширення мережі прикордонних зернових контейнерних терміналів у логістичних ланцюгах за участю залізничного транспорту.

Дороге перевантажувальне обладнання та завищення цін призводить до збільшення собівартості переробки контейнерів у кілька разів. У табл. 3 подано граничні, середні величини тарифів на перевалку двадцятифутових (TEU) завантажених контейнерів у країнах світу.

Таблиця 3

Середня вартість вантажно-розвантажувальних робіт, USD

Країна порту	Тип контейнера			
	TEU	20ft RF	FEU	40ft RF
Ізраїль	90	90	90	90
Латвія	100	100	100	100
Литва	60	60	60	60
Польща, Гдиня / Гданськ	75	85	75	85
Польща, Щецин	85	85	85	85
Румунія	200	245	245	290
Україна	90	115	115	140

Завищення цін призводить до збитків у вантажовласників і зернотрейдерів, а контейнери, навантажені в сусідніх країнах, замість залізниці автотранспортом прямують до України. Перевезення контейнерів за такою схемою стає для вантажовласників вигіднішим, ніж пряме перевезення залізницею з передаванням на

кордоні з вагонів однієї колії на іншу. Зростання експортних вантажоперевезень актуалізує проблеми, що стосуються роботи всіх видів транспорту:

- дефіцит переробної спроможності прикордонних пунктів і незбалансований їхній розвиток з огляду на суміжні види транспорту;

- недостатня організаційна, технологічна та інформаційна взаємодія учасників перевезень зернових вантажів;
- недосконала правова база, що регулює відносини між суміжними видами транспорту, споживачами транспортних послуг, митними органами;
- застаріла та нерозвинена логістична інфраструктура;
- відсутність сучасного вітчизняного логістичного обладнання, що відповідає сучасним вимогам щодо швидкості та потужності переробки зернових вантажів, і висока вартість відповідного обладнання закордонного виробництва;
- складне і тривале митне оформлення вантажів.

Розглянемо прикордонний контейнерний зерновий термінал як ланку логістичного ланцюга, у якому передають вантажо-

потоки із внутрішньодержавних залізниць за кордон на інший вид транспорту, у тому числі залізничний транспорт іншої держави зі зміною ширини колії. Пропускні спроможності прикордонного зернового терміналу визначають сукупністю пропускних спроможностей окремих перевантажувальних комплексів і прикордонної передавальної залізничної станції.

Припортовий прикордонний зерновий контейнерний термінал складається з таких технологічних ділянок (рис. 3):

- А – ділянка розвантаження контейнерів із суден;
- Б – ділянка зберігання та митного огляду контейнерів;
- В – ділянка навантаження контейнерів на залізничний транспорт;
- Г – ділянка навантаження контейнерів на автотранспорт.

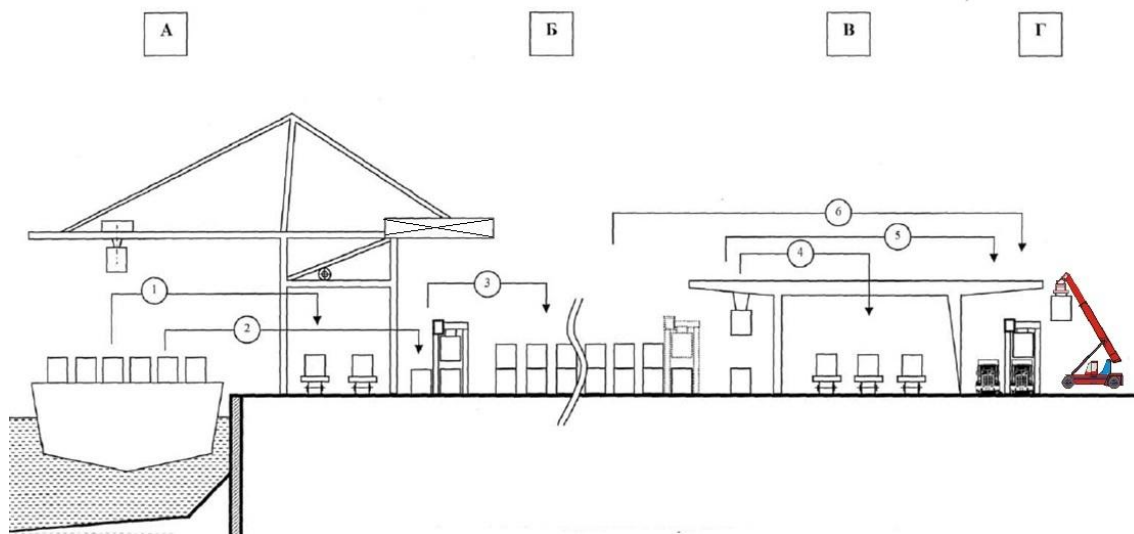


Рис. 3. Технологічна схема припортового зернового контейнерного терміналу

За прямого перевантаження контейнерів із зерном із суден на залізничний транспорт (вантажопотік 1) спостерігають найвищу продуктивність причального перевантажувача. Однак ця операція має бути пов'язана з подаванням вагонів під навантаження та виконанням

митного оформлення. Перевантаження контейнерів із суден у зону зберігання (вантажопотік 2) не потребує одночасного подавання залізничних вагонів. Операції з митного оформлення виконують під час перебування контейнерів у зоні зберігання Б. Портальний навантажувач або

фронтальний навантажувач (ричстакер) на пневмоходу переміщує контейнери на склад тривалого зберігання (вантажопотік 3) або здійснює навантаження контейнерів в автотранспорт (вантажопотік 6 у зоні Г). Завантажують контейнери в залізничні вагони з використанням козлового крана за схемами 4-го та 5-го вантажопотоків у зоні В.

Сухопутний прикордонний зерновий контейнерний термінал складається з таких технологічних ділянок (рис. 4):

- Д – ділянка перевантаження контейнерів із вагонів на автотранспорт;
- Е – ділянка перевантаження контейнерів у залізничні вагони різної ширини колії;
- Ж – ділянка навантаження контейнерів на залізничний транспорт;
- З – ділянка доставлення контейнерів із зони зберігання та митного огляду.

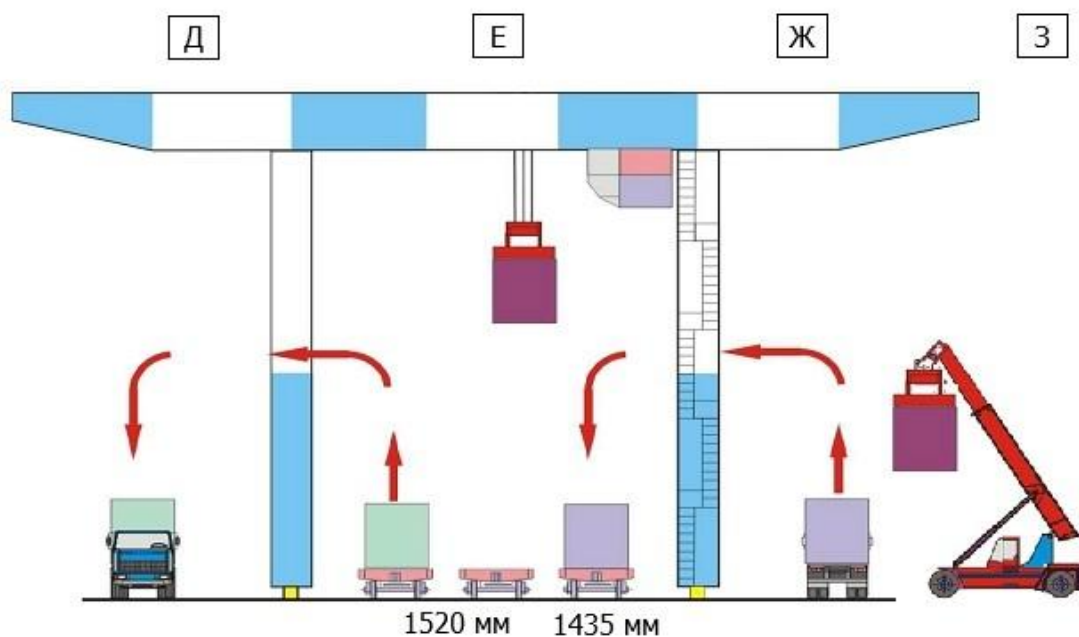


Рис. 4. Технологічна схема сухопутного прикордонного зернового контейнерного термінала

Під час прямого перевантаження контейнерів із зерном із вагонів на автомобілі (зона Д) і з автомобілів на залізничний транспорт (зона Ж) найбільш ефективно використовують козловий кран. Якщо ця операція пов'язана з подаванням вагонів під навантаження та виконанням митного оформлення, ефективно подавати контейнери із зерном із зони зберігання фронтальним навантажувачем (ричстакер) на пневмоходу (зона З). Перевантажують

контейнери у залізничні вагони різної ширини колії з використанням козлового крана в зоні Е.

Технологія роботи зернового перевантажувального комплексу визначена ланцюгом «вантажний фронт по прибуттю – склади – вантажний фронт по відправленню». Перевантаження зернових вантажів за прямим варіантом («залізничний вагон – автомобіль», «залізничний вагон – судно», «залізничний

вагон – залізничний вагон») може бути ефективним, якщо ця технологія не спричиняє простої автомобілів, суден і вагонів в очікуванні навантаження/вивантаження. Простої автомобілів, суден і залізничних вагонів також можуть виникати за невідповідності місткості прикордонного зернового терміналу величині вантажопотоків і нестачі перевантажувального обладнання.

Збитки від простою транспортних засобів на прикордонному контейнерному зерновому терміналі та в очікуванні можна розрахувати за формулою

$$B_{\Pi} = \sum_{i=1}^k n_i * c_{\text{тзі}} * \Delta t_i, \quad (1)$$

де n_i – кількість транспортних засобів i -го типу (загальна кількість типів яких дорівнює k), що стоять в очікуванні навантаження/вивантаження;

$c_{\text{тзі}}$ – вартість простою транспортних засобів i -го типу (автомобілів, суден, залізничних вагонів тощо), грн/год;

Δt_i – час непродуктивного простою транспортних засобів i -го типу, год.

Вартість простою транспортного засобу можна обчислити за формулою

$$c_{\text{тзі}} = c_{1i} + c_{\text{ді}}, \quad (2)$$

де c_{1i} – витрати на обробку одного навантаженого транспортного засобу та зберігання зернового вантажу в ньому. Визначають розрахунковим шляхом і враховують відрахування на амортизацію, технічне обслуговування та ремонт транспортного засобу з урахуванням інфраструктурної складової, заробітної плати причетних працівників, податків на майно, природної норми втрат зернового вантажу тощо, грн/год;

$c_{\text{ді}}$ – втрати доходів залізничного транспорту за час простою, що пов'язані з неможливістю транспортного засобу здійснювати вантажне перевезення, грн/год.

Витрати на обробку та зберігання зернового вантажу у транспортному засобі протягом доби визначають за формулою

$$c_{1i} = c_{\text{кі}} + c_{\text{мі}} + B_{\Pi i} + (c_{\text{моі}} + c_{\text{воі}}) * k_{\text{ауп}}, \quad (3)$$

де $c_{\text{кі}}$ – витрати на зберігання вантажу у транспортному засобі та зайняття логістичної інфраструктури (залізничної колії вагоном, причалу судном тощо), грн/год;

$c_{\text{мі}}$ – витрати на маневрову роботу з приймання, відправлення та розбирання передавального поїзда з розрахунку на один вагон, грн/год;

$B_{\Pi i}$ – збитки, пов'язані з природною нормою втрат зернового вантажу, грн/год;

$c_{\text{моі}}$ – витрати на заробітну плату працівникам, які виконують додатковий технічний і комерційний огляд транспортних засобів (суден, автомобілів, вагонів), грн/год;

$c_{\text{воі}}$ – витрати на охорону завантажених транспортних засобів за час їх простою, грн/год;

$k_{\text{ауп}}$ – коефіцієнт, що враховує витрати на утримання адміністративно-управлінського персоналу, загальногосподарські та інші накладні витрати.

Для обслуговування прикордонного зернового терміналу прикордонною передавальною станцією кількість колій для вагонів, направлених на адресу терміналу, визначають за формулою [1]

$$m_{\text{пс}} = \frac{N_{\text{сп}} * t_{\text{см}}}{24L_{\text{в}}}, \quad (4)$$

де N_{cp} – середньодобова кількість завантажених вагонів, поданих під перевантаження зернових вантажів, що надходить до термінала;

t_{cm} – технологічний час обробки вагонів на прикордонній передавальній станції, год;

L_e – прийнята місткість однієї колії, вимірювана кількістю вагонів за

встановленою ваговою нормою передавання, м.

Витрати на зберігання вантажу у транспортному засобі та зайняття логістичної інфраструктури c_{ki} визначають за формулою

$$c_{ki} = \frac{1}{365} * [S_{vi}(n_{ati} + n_{pvi} + P_3) + S_n l_n (n_{aki} + n_{рки} + P_3)] * 10^{-2}, \quad (5)$$

де S_{vi} – вартість одного транспортного засобу, грн;

n_{ati} – норма амортизаційних відрахувань на транспортний засіб, %;

n_{pvi} – норма відрахування на ремонти, технічне обслуговування та мастильні матеріали, %;

P_3 – ставка податку на основні засоби, %;

S_n – вартість одного погонного метра інфраструктури (причалу, пандуса, залізничної колії), грн;

l_n – довжина одиниці інфраструктури, необхідна для встановлення одного транспортного засобу, м;

n_{aki} – норма амортизаційного відрахування за рік від вартості логістичної інфраструктури, %;

$n_{рки}$ – норма відрахувань на ремонти і технічне утримання логістичної інфраструктури, %.

Витрати на маневрову роботу з приймання, відправлення, розбирання передавального поїзда, подавання або прибирання на причали або до зони митного контролю з розрахунку на один вагон розраховують за формулою

$$c_{mi} = c_l \frac{24 \Delta t_{mi}}{n_v t_{pri}}, \quad (6)$$

де c_l – вартість однієї локомотиво-години роботи маневрового локомотива, грн/год;

Δt_{mi} – загальна тривалість маневрових робіт із приймання, відправлення та

розбирання одного передавального поїзда, год;

n_v – кількість вагонів у передавальному поїзді;

t_{pri} – тривалість простою вагонів в очікуванні подавання на прикордонний зерновий термінал і перевантаження, діб;

Витрати на заробітну плату працівникам, які виконують додатковий технічний і комерційний огляд транспортних засобів (суден, автомобілів, вагонів)

$$c_{moi} = \frac{c_{mo} R_{moi} k_{фоп} t_{moi}}{n_{pd} t_{cm} n_v t_{pri}}, \quad (7)$$

де c_{mo} – середня заробітна плата на місяць оглядачів транспортних засобів і вантажів, грн/люд. міс.;

R_{moi} – загальна кількість працівників, які виконують додатковий технічний і комерційний огляд i -го транспортного засобу, осіб;

$k_{фоп}$ – коефіцієнт, що враховує відрахування до позабюджетних фондів від фонду оплати праці;

t_{moi} – загальна тривалість додаткового технічного та комерційного огляду i -го транспортного засобу, год;

n_{pd} – середня кількість робочих днів на місяці, діб;

t_{cm} – тривалість робочої зміни, год.

Для порівняння технологічних варіантів за формулами (1)–(7) розраховано питому вартість технологічних варіантів передавання 1 т зернових вантажів з перевезенням за участю залізничного транспорту з урахуванням очікування подавання на прикордонний термінал. Встановлено, що технологічний варіант перевезення зернового вантажу в контейнерах, незалежно від тривалості очікування в черзі на прикордонний термінал, фінансово вигідніше, ніж технологічні варіанти перевезення автотранспортом і у вагонах-зерновозах

ЦТЛ (у сезон, коли є дефіцит зерновозів). Для перевезення зерна у власних вагонах-зерновозах і вагонах ЦТЛ (у міжсезоння, коли є профіцит зерновозів) фінансово вигідніше використовувати перевезення в контейнерах за тривалості очікування у черзі на прикордонний термінал не більше п'яти діб, що пов'язано з високою питомою добовою ставкою оренди контейнера. У перспективі застосування запропонованих методів заплановано у вигляді СППР, орієнтованої на оперативних співробітників і логістів з урахуванням стохастичного характеру дослідних параметрів.

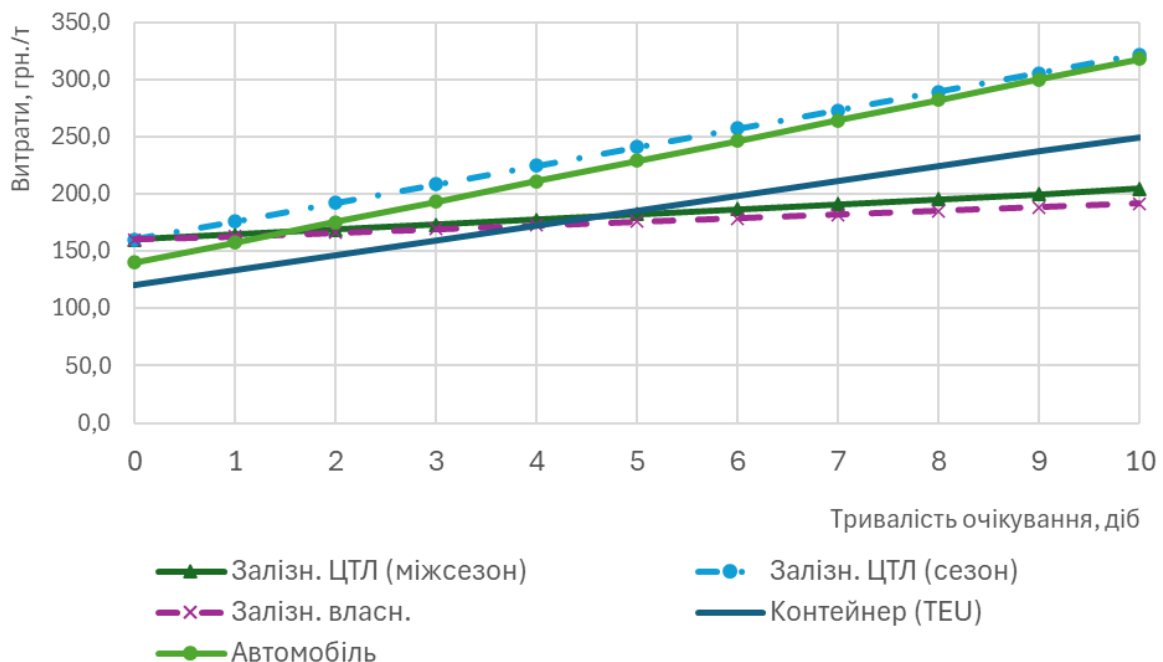


Рис. 5. Порівняння питомої вартості технологічних варіантів передавання 1 т зернових вантажів

Застосування запропонованих підходів передбачено удосконалити врахуванням стохастичної природи дослідних параметрів і використати для підтримки управлінських рішень у реальних умовах у вигляді СППР оперативних працівників і логістів.

Висновок. Розвиток зовнішньоторговельних зв'язків і збільшення експортно-

імпортних вантажопотоків зумовлює значущість успішної взаємодії різних видів транспорту на сухопутних терміналах і в портових комплексах, незважаючи на воєнний стан у країні.

Аналіз обсягів перевезень контейнерних вантажів показав, що логістична система країни адаптувалася до введення воєнного стану: після значного

падіння обсягів перевезень контейнерів у 2022 році в останні два роки обсяги перевезень контейнерних вантажів стабільно зростають щорічно на 30 %. За цих умов частка експортних логістичних ланцюгів за участю сухопутних прикордонних переходів склала 64 %, що робить гостріше проблему у сфері взаємодії суміжних видів транспорту.

Сучасною тенденцією є перевезення зернових вантажів у контейнерах. Важливість удосконалення технології перевезень зернових вантажів у контейнерах підтверджує той факт, що у 2021 році частка зернових складала 8 %, а у 2024 році – 39 % загального контейнерообігу країни. Встановлено, що загальна потреба в переробці контейнерів на сухопутних міждержавних переходах складає в середньому 47 % наявної переробної спроможності прикордонних контейнерних терміналів, тому для зменшення черг на прикордонних переходах із вагонів, звантажених зерновими вантажами, запропоновано частину зернового вантажопотоку перевозити в контейнерах.

Досліджено особливості роботи прикордонного контейнерного зернового терміналу як частини логістичного ланцюга за участю залізниці. Встановлено, що незалежно від типу контейнерного зернового терміналу можна виділити схожі

за технологією обробки контейнерів функціональні ділянки, на яких застосовано близьку за типом техніку для виконання вантажних робіт. Особливістю є тільки переробна спроможність функціональних ділянок, обумовлена місткістю транспортних засобів із зерном, що взаємодіють, кількістю задіяної техніки та корисною площею терміналу.

Недостатня переробна спроможність прикордонних зернових контейнерних терміналів призводить до утворення черг із транспортних засобів, зокрема, з боку залізниці середній непродуктивний простій на початку 2025 року склав чотири доби. Це призводить до збитків від простою транспортних засобів на прикордонному контейнерному зерновому терміналі та в очікуванні подавання на нього. Встановлено та досліджено складові непродуктивного простою транспортних засобів, порівняно технологічні варіанти за питомою вартістю передавання 1 т зернових вантажів. Доведено, що технологічний варіант перевезення зернового вантажу в контейнерах фінансово вигідніше, ніж варіанти перевезення автотранспортом і у вагонах-зерновозах ЦТЛ у сезон. Для перевезення зерна у власних вагонах-зерновозах і вагонах ЦТЛ у міжсезоння контейнерний варіант перевезення є вигідним за тривалості очікування в черзі на прикордонний термінал не більше п'яти діб.

Список використаних джерел

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р. № 430-р. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80>.
2. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Шандер О. Е. Розробка СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів в рамках системи інтермодальних перевезень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 29-42.
3. Yan B., Zhu X., Lee D-H, Jin J. G., Wang L. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. 141(6):106296.
4. Hu Q., Wiegman B., Corman F., Lodewijks G. Integration of inter-terminal transport and hinterland rail transport. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2019. 31. P. 807–831.

5. Ломотько М. Д. Формування ланцюга постачання вантажів у контейнерах на основі «зеленої» логістики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 1. С. 44-52.
6. Екологічні аспекти застосування «зеленої» логістики при мультимодальних вантажних перевезеннях / Д. В. Ломотько, О. М. Огар, Д. С. Козодой та ін. *Залізничний транспорт України*. 2021. № 2. С. 49-62. DOI: 10.34029/2311-4061-2021-139-2-49-62.
7. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О., Артемов Е. М., Лагно О. С. Методи організації вантажних залізничних перевезень на основі ризикорієнтованих технологій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 38-45.
8. Арсененко Д. В., Ломотько Д. В., Ковальова О. В. Розроблення оптимальної технології перевезення зернових вантажів з урахуванням сучасних тенденцій галузі. *Збірник наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2024. Вип. 208. С. 215-222. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308751>.
9. Muraev D., Hu H., Rakhmangulov A., Mishkurov P. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port. *International Journal of Information Management*. 2021. Vol. 57. 102133. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133.
10. АТ Укрзалізниця. Офіційний сайт. URL: <https://uz.gov.ua/>.
11. Прикордонні переходи для експорту зерна: станції та деталі. Українська Зернова Асоціація. URL: <https://uga.ua/news/prikordonni-perehodi-dlya-eksportu-zerna-stantsiyi-ta-detali/#undefined>.
12. Ломотько Д. В., Вейісов Т. З. Удосконалення технології передачі вантажопотоку при взаємодії залізничного та морського транспорту. *Збірник наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ. 2014. Вип. 150. С. 91-97.

Ломотько Денис Вікторович, д-р техн. 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, канд. техн. 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: kolyanl890@gmail.com.

Афанасова О. Ф., аспірантка кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD <https://orcid.org/0000-0003-4921-6534>. Тел.: +38(063)2344943.

E-mail: afanasova_olya@ukr.net.

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 Denysovych 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: kolyanl890@gmail.com.

Afanasova O. F., PhD student of the Department of Transport Systems and Logistics of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD <https://orcid.org/0000-0003-4921-6534>. Tel.: +38(063)2344943.

E-mail: afanasova_olya@ukr.net.

Статтю прийнято 25.03.2025 р.

УДК 656.2

**ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПІДСИСТЕМИ
МІСЦЕВОЇ РОБОТИ СОРТУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ КОЛЬОРОВИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ**

Асп. В. С. Сергієв, кандидати техн. наук В. М. Прохоров, Т. Ю. Калашнікова,
О. Е. Шандер, Т. В. Головко

**FORMATION OF A TECHNOLOGICAL PROCESS MODEL FOR THE LOCAL
OPERATIONS SUBSYSTEM OF A MARSHALLING YARD STATION USING THE
MATHEMATICAL APPARATUS OF COLOURED PETRI NETS**

Postgraduate student V. Serhieiev, PhD (Tech) V. Prokhorov,
PhD (Tech) T. Kalashnikova, PhD (Tech) O. Shander, PhD (Tech) T. Golovko

***Анотація.** У статті розглянуто формування моделі технологічного процесу підсистеми місцевої роботи сортувальної станції з використанням математичного апарату кольорових мереж Петрі (CPN Tools). Основну увагу приділено оцінюванню ефективності цього підходу для моделювання складних динамічних процесів, характерних для роботи залізничних станцій.*

Кольорові мережі Петрі дають змогу не лише диференціювати об'єкти різних типів за допомогою кольорових фішок, а й моделювати часові аспекти процесів із використанням різних статистичних розподілів, зокрема експоненційного, нормального та розподілу Ерланга. Це підвищує гнучкість і точність моделі.

Результати моделювання показують, що середня довжина черги вагонів, які очікують на подавання, залежить не лише від середнього часу виконання операцій маневровим локомотивом, але і дисперсії цього часу. Очікуваним є те, що збільшення середнього часу операцій веде до зростання черги. Однак менш очевидним є вплив дисперсії: підвищена волатильність порушує ритмічність процесу, створює «вузькі позиції» і спричиняє накопичення затримок у системі.

Цей висновок свідчить про те, що нестабільність у тривалості операцій може мати значно негативний вплив, ніж навіть нестача маневрових потужностей. Урахування цього чинника є критично важливим для ефективного планування роботи технічних залізничних станцій. Крім того, отримані результати підкреслюють, що не лише оперативне планування, а й точність реалізації операцій на практиці відіграють вирішальну роль у продуктивності системи.

Важливо, що подібний аналіз був би складним без використання кольорових мереж Петрі, які дають змогу моделювати складні взаємодії між різними типами об'єктів (локомотивами, вагонами, коліями) і враховувати часові характеристики процесів. Це підтверджує ефективність CPN Tools як потужного інструменту для аналізу та оптимізації технологічних процесів у залізничних системах.

***Ключові слова:** кольорові мережі Петрі, CPN Tools, моделювання технологічних процесів, підсистема місцевої роботи.*

***Abstract.** The article examines the formation of a technological process model for the local operations subsystem of a marshalling yard using the mathematical apparatus of Coloured Petri Nets*

(CPN Tools). The primary focus is on evaluating the effectiveness of this approach in modeling complex dynamic processes characteristic of railway station operations.

Coloured Petri Nets not only allow differentiation of objects of various types using coloured tokens but also enable the modeling of temporal aspects of processes through different statistical distributions, including exponential, normal, and Erlang distributions. This enhances the flexibility and accuracy of the model.

Simulation results indicate that the average queue length of wagons awaiting dispatch depends not only on the mean duration of shunting locomotive operations but also on the variance of this duration. While it is expected that an increase in the mean operation time leads to longer queues, the impact of variance is less obvious. Increased volatility disrupts the rhythmicity of the process, creates bottlenecks, and causes the accumulation of delays in the system.

This finding suggests that instability in operation durations can have a significantly more negative impact than even a lack of shunting capacity. Considering this factor is critically important for effective planning of railway yard operations. Moreover, the results highlight that not only operational planning but also the precise execution of operations in practice plays a decisive role in system performance.

Notably, such an analysis would be challenging without the use of Coloured Petri Nets, which enable the modeling of complex interactions between different types of objects (locomotives, wagons, tracks) while accounting for the temporal characteristics of processes. This confirms the effectiveness of CPN Tools as a powerful instrument for analyzing and optimizing technological processes in railway systems.

Keywords: Coloured Petri Nets, CPN Tools, technological process modeling, local operations subsystem.

Постановка проблеми. Сучасні залізничні системи є складними динамічними об'єктами, які потребують ефективного управління для забезпечення безпеки, пунктуальності та економічної ефективності. Однією з основних проблем у процесі функціонування залізничних станцій є організація місцевої роботи, яка включає обслуговування місцевих вагонів, виконання маневрових операцій і взаємодію з іншими підсистемами, такими як сортувальні станції. Незважаючи на широке використання сучасних методів моделювання та оптимізації, існують значні труднощі у врахуванні всіх чинників, що впливають на ефективність роботи станцій.

Основним викликом є необхідність урахування динамічних змін у системі, таких як зміни інтенсивності руху поїздів, варіації часу виконання операцій і змінність оперативної обстановки. Крім того, сучасні моделі часто не враховують людський чинник, такі як помилки диспетчерів або операторів, що може призводити до значних

відхилень від запланованих показників. Це створює необхідність розроблення нових підходів для моделювання та оптимізації роботи залізничних станцій, що дає змогу враховувати як технічні, так і організаційні аспекти роботи системи.

Отже, актуальним є розроблення нових методів моделювання, щоб враховувати змінність оперативної обстановки та динамічні зміни в системі. Це включає використання сучасних підходів, таких як кольорові мережі Петрі, агентно-орієнтоване моделювання та симуляційна оптимізація, для більш точного відображення реальних умов роботи і розроблення ефективних стратегій управління. Це дасть змогу не лише підвищити ефективність роботи станцій, але й забезпечити більш стабільну та передбачувану роботу залізничних систем у цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] запропоновано стохастичну модель динамічного розподілу

трафіка, що враховує випадкові тимчасові залежності попиту. Автори стверджують, що така модель забезпечує надійне вирішення завдання оптимізації системи, урахувуючи невизначеність і пропонуючи корисні стратегії управління. Однак моделі не враховують можливі зміни в поведінці користувачів, що може вплинути на результати в умовах реального часу.

У статті [2] запропоновано підхід для оптимізації розкладу руху поїздів за умов невизначеності під час порушень. Автори продемонстрували, як симуляційні методи можуть бути використані для ефективного планування, щоб зменшити затримки та покращити управління рухом. Однак модель не враховує соціально-економічні наслідки затримок, що може вплинути на загальну ефективність управління.

У статті [3] запропоновано новий підхід для моделювання та симуляції високошвидкісних поїздів за допомогою технології, базованій на мультиагентному моделюванні. Автори підкреслюють, що цей метод дає змогу ефективно досліджувати взаємозв'язки між індивідуальною поведінкою компонентів системи та їх загальною продуктивністю, що особливо актуально для складних систем високошвидкісного залізничного транспорту. Однак запропонована модель не враховує вплив зовнішніх чинників, таких як погодні умови або людський чинник, що може обмежити практичність застосування в реальних сценаріях.

У статті [4] розглянуто оптимізацію розкладу руху поїздів під час великих порушень, зокрема блокування колій. Автори розробили симуляційно-оптимізаційну модель, яка включає динамічні правила пріоритету для зменшення загального часу затримок поїздів. Результати дослідження вказують на істотні переваги запропонованого підходу порівняно з комерційним програмним забезпеченням, зокрема швидкість отримання практичних рішень і їхня точність, проте модель може не

враховувати специфічні локальні умови, які можуть вплинути на ефективність.

У статті [5] розглянуто моделювання роботи залізничного вокзалу за допомогою моделювання на основі систем дискретних подій. Автори розробили модель, яка дає змогу деталізувати поведінку агентів, зокрема алгоритми для прибуття поїздів та управління пасажиропотоками. Результати тестування моделі свідчать про ефективність запропонованих рішень, хоча зазначимо, що специфіка місцевих умов може вплинути на загальну адаптивність моделі.

У статті [6] запропоновано узагальнену модель симуляції руху поїздів на основі використання математичного апарату клітинних автоматів. Автори розглядають, як команди розкладу впливають на динаміку руху поїздів, підкреслюючи взаємозалежність між поїздами та управлінськими командами. Модель розбиває подорож на серію рухів по блоках з обмеженнями швидкості, реалізуючи динамічні оновлення швидкості, що відображує реалістичні корекції. Результати симуляцій демонструють, що модель може бути корисною для підвищення ефективності залізничної мережі. Проте слід зазначити, що складність моделі може потребувати значних обчислювальних ресурсів.

У статті [7] проаналізовано особливості роботи технічної станції в умовах необхідності зважування вагонів, з акцентуванням на технології обробки поїздів і статистичних даних про поїздопотоки. Досліджено стаціонарність роботи підсистем станції та запропоновано удосконалення сучасної методики, включаючи моделювання роботи станції як багатofазної системи масового обслуговування. Однак, незважаючи на детальний аналіз, недостатньо враховано можливі зовнішні чинники, які можуть впливати на ефективність роботи станції а також не наведено модель взаємодії підсистем технічної станції.

У статті [8] розглянуто умови посилення взаємодії між підсистемами технічної станції та прилеглими дільницями, що має на меті підвищення ефективності обробки поїздів і покращення координації між різними елементами системи. Пропоновано ряд заходів для оптимізації комунікаційних процесів, що дасть змогу зменшити затримки та покращити загальну продуктивність станції. Проте, незважаючи на позитивні аспекти, не враховано можливі ризики, пов'язані з впровадженням нових технологій взаємодії, які можуть потребувати значних інвестицій і часу на адаптацію персоналу. Крім того, відсутність оцінювання впливу змін на процеси, що вже відбуваються, може призвести до непередбачуваних ускладнень у роботі станції. Однак, незважаючи на детальний аналіз, недостатньо враховано можливі зовнішні чинники, які можуть впливати на ефективність роботи станції, такі як зміни в поїздопотоках чи технічні збої. Крім того, запропоновані методи удосконалення можуть потребувати додаткових ресурсів для реалізації, що не завжди може бути виправдано.

Отже, основними викликами є необхідність урахування динамічних змін у системі, таких як зміни інтенсивності руху поїздів, варіації часу виконання операцій і вплив зовнішніх чинників тощо.

Формулювання цілей. Метою дослідження є розроблення моделі для оптимізації роботи залізничних станцій, яка враховує мінливість оперативної обстановки та динамічні зміни в системі. Основне завдання полягає у створенні інструменту, що дає змогу ефективно планувати обслуговування місцевих вагонів, виконувати маневрові операції та мінімізувати час очікування. Для досягнення цієї мети необхідно вивчити сучасні підходи для моделювання та визначити оптимальні методи для врахування ключових чинників, що впливають на ефективність роботи станцій.

Викладення основного матеріалу дослідження. Кольорові мережі Петрі (англ. Colored Petri Nets, CPN) є потужним інструментом для моделювання складних технологічних процесів, зокрема в залізничних системах. Їхня перевага полягає в тому, що вони дають змогу враховувати різні типи (кольори) об'єктів (наприклад вагони, локомотиви, колії) і їхні взаємодії, що є основним для аналізу та оптимізації роботи залізничних станцій. Завдяки використанню кольорових фішок, які відображують різні типи даних, кольорові мережі Петрі дають змогу моделювати складні системи з високим рівнем деталізації.

Однією з головних переваг кольорових мереж Петрі є їхня здатність ураховувати паралельні процеси та часові затримки, що є критично важливим для моделювання залізничних операцій. Наприклад, одночасне обслуговування кількох поїздів або виконання маневрових операцій може бути ефективно відображено за допомогою кольорових мереж Петрі. Крім того, кольорові мережі Петрі дають змогу інтегрувати часові мітки та закони розподілу, що робить їх ідеальними для моделювання реальних умов, де час виконання операцій може варіюватися.

Ще однією важливою перевагою є наочність і структурованість моделей на основі кольорових мереж Петрі. Вони дають змогу візуалізувати складні процеси у вигляді графічних діаграм, що спрощує аналіз і комунікацію між фахівцями. Це особливо важливо для залізничних систем, де необхідно враховувати велику кількість взаємопов'язаних елементів. Отже, використання кольорових мереж Петрі для моделювання технологічних процесів у залізничних системах є обґрунтованим, оскільки вони дають змогу враховувати складні взаємодії, часові затримки та різні типи об'єктів, що робить їх ефективним інструментом для аналізу та оптимізації роботи залізничних станцій. CPN Tools [9] — це інструмент для моделювання та

аналізу кольорових мереж Петрі, за допомогою якого можна створювати моделі та симулювати процеси в них, що допомагає досліджувати складні системи, такі як програмне забезпечення, мережі чи бізнес-процеси. Інтерфейс CPN Tools графічний,

що робить його зручним для розуміння та роботи. Основна мета — аналіз поведінки систем і виявлення потенційних помилок. На рис. 1 наведений інтерфейс програми CPN Tools.

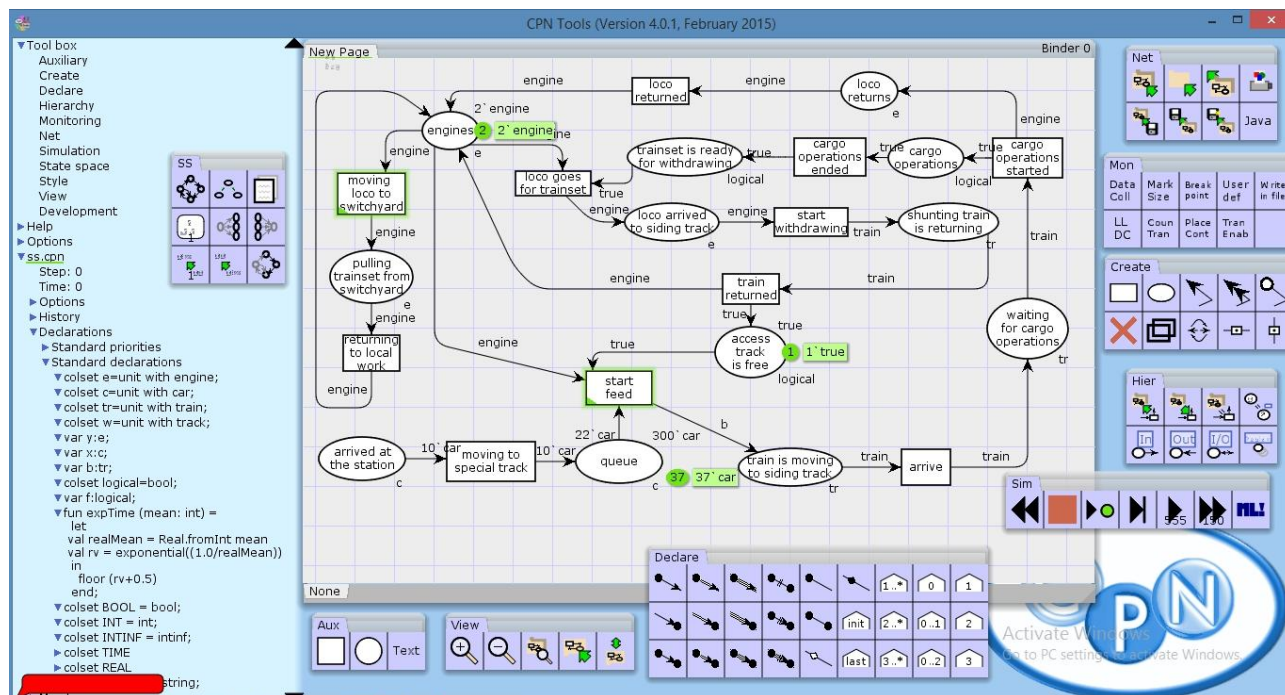


Рис. 1. Інтерфейс середовища CPN Tools

Підсистема місцевої роботи сортувальної станції забезпечує обробку вагонів, які прибувають для виконання вантажних операцій (навантаження, вивантаження, перевантаження). Вагони прибувають у складі поїздів або окремими групами, після чого їх розподіляють за призначенням. Вони формують чергу на спеціальних коліях, звідки маневровий локомотив переміщує їх на вантажні пункти для виконання операцій. Після завершення навантаження або вивантаження вагони повертають на колії, де формують у нові поїзди або додають до вже сформованих складів для подальшого відправлення.

Ефективність цієї підсистеми залежить від організації руху локомотивів,

розподілу ресурсів (колії, вантажні пункти) і мінімізації часу простою вагонів. Важливим аспектом є врахування непередбачуваних чинників, таких як зміни тривалості операцій, що впливають на загальну продуктивність станції. Завдяки правильній організації процесів підсистема місцевої роботи забезпечує своєчасне виконання вантажних операцій, зниження витрат і підвищення пропускної спроможності станції.

На основі аналізу сучасних підходів і вимог до моделювання залізничних систем розроблено модель функціонування підсистеми місцевої роботи сортувальної станції. Ця модель урахує основні аспекти роботи станції, такі як обслуговування

місцевих вагонів, виконання маневрових операцій і взаємодію з іншими підсистемами. Модель побудована на основі

кольорових мереж Петрі, що дає змогу враховувати різні кольори об'єктів (вагони, локомотиви, колії) і їхні взаємодії (рис. 2).

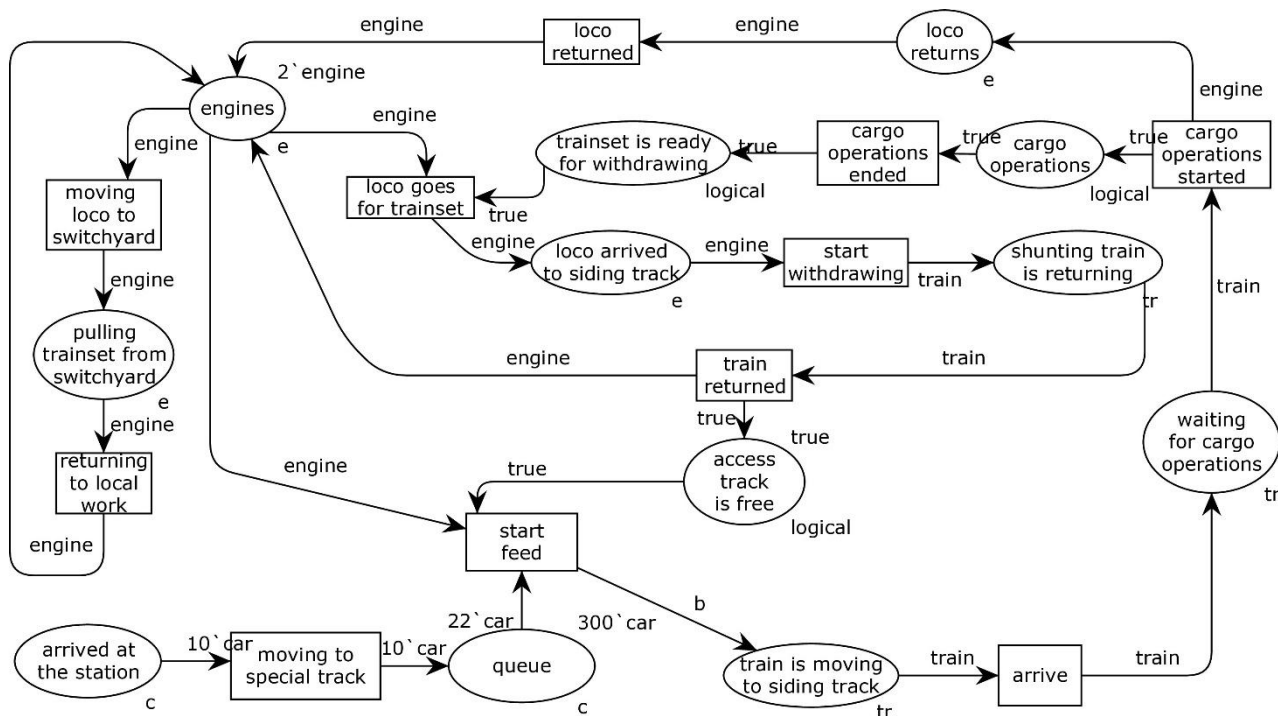


Рис. 2. Кольорова мережа Петрі, яка моделює підсистему місцевої роботи сортувальної станції

Модель включає часові параметри, щоб аналізувати затримки та оптимізувати рух маневрових составів. Крім того, вона враховує мінливість оперативної обстановки, що робить її більш адаптивною до реальних умов роботи станції. Завдяки використанню кольорових фішок і часових міток модель відображає складні процеси, такі як одночасне обслуговування кількох маневрових составів або виконання маневрових операцій.

Розроблена модель є ефективним інструментом для аналізу та оптимізації роботи підсистеми місцевої роботи сортувальної станції. Вона дає змогу виявляти «вузькі позиції» у системі, прогнозувати затримки та розробляти стратегії для підвищення ефективності роботи станції.

Ця модель, створена в CPN Tools, являє собою кольорову мережу Петрі, яка моделює технологічний процес функціонування підсистеми місцевої роботи на залізничній сортувальній станції. Модель включає різні стани і переходи, які відображують логіку роботи системи. Ось короткий опис основних елементів моделі:

1. Позиції (Places):

- engines: позиція, що відображує наявні локомотиви (колір 'e');
- queue: черга вагонів (колір 'c'), які очікують на обробку;
- train is moving to siding track: стан, коли маневровий состав рухається до під'їзної колії (колір 'tr');
- access track is free: логічний стан, що вказує на вільність під'їзної колії (колір 'logical');

- waiting for cargo operations: стан очікування на вантажні операції (колір `tr`);
- cargo operations: позначення активності вантажних операцій (колір `logical`);
- trainset is ready for withdrawing: стан готовності маневрового состава до виведення (колір `logical`);
- loco returns: повернення локомотива (колір `e` (маневровий локомотив));
- loco arrived to siding track: прибуття локомотива до бічної колії (колір `e`);
- shunting train is returning: повернення маневрового состава (колір `tr` (маневровий состав));
- pulling trainset from switchyard: витягування маневрового состава з колії сортувального парку (колір `e`);
- arrived at the station: прибуття вантажівки на станцію (колір `c` (вагон)).

2. Переходи (Transitions):

- start feed: початок подавання локомотива;
- arrive: прибуття маневрового состава;
- cargo operations started: початок вантажних операцій;
- loco goes for trainset: локомотив рухається до маневрового состава;
- cargo operations ended: завершення вантажних операцій.

3. Додаткові елементи.

Глобальні змінні та кольори: модель використовує кольори, такі як `e` (локомотив), `c` (вагон), `tr` (маневровий состав), `logical` (логічний колір), а також функції, наприклад `expTime`, яка моделює експоненційний розподіл часу.

Модель демонструє взаємодію між локомотивами, маневровими составами та вантажними операціями, використовуючи кольорові мережі Петрі для відображення станів і переходів. Вона дає змогу аналізувати логіку роботи залізничної станції, виявляти потенційні проблеми та оптимізувати процеси.

Модель кольорової мережі Петрі в цій системі служить деталізованим інструментом для аналізу процесів, що відбуваються на залізничній станції. Вона ілюструє взаємодію між локомотивами, вагонами та різними операціями, які забезпечують ефективне функціонування транспортної системи.

Почнемо з позиції «engines» (локомотиви). Ця позиція ініціалізована двома токенами, що означає наявність двох локомотивів у системі. Токени тут являють собою активні локомотиви, готові до виконання маневрів і транспортування. Позиція «engines» є відправною точкою всіх подальших операцій, оскільки від наявності локомотивів залежить можливість виконання різних дій у системі.

Наступною позицією є «cars» (місцеві вагони, які надходять до станції). Ці токени символізують готові до виконання операцій вагони, які можуть бути задіяні в завантаженні чи розвантаженні. Позиція «cars» демонструє запаси вагонів, доступних для здійснення операцій подавання/прибирання на вантажні фронти під'їзних колій.

Перехід «start feed» (початок подавання) ініціює процес взаємодії між локомотивами та вагонами. Цей перехід активується, коли на позиції «engines» присутні токени. З активацією переходу локомотиви починають рухатися до наступної позиції, що запускає ланцюжок подій моделі.

Локомотиви переміщуються до позиції «train is moving to siding track» (маневровий состав рухається до під'їзної колії). Тут локомотиви направляють до бічного шляху для маневрування, що може бути необхідно для підготовки до вантажних операцій або очікування подальших вказівок. Ця позиція є проміжним станом, у якому локомотиви готові до виконання наступних кроків.

Позиція «access track is free» (під'їзна колія вільна) вказує на те, що шлях для маневрів відкритий. Цей стан є критично

важливим для забезпечення безперешкодного руху локомотивів і вагонів, а також запобігання затримкам. У випадку, якщо шлях зайнятий, локомотиви не зможуть продовжити рух.

Після досягнення позиції «waiting for cargo operations» (очікування навантаження) локомотиви сигналізують про готовність виконувати вантажні операції. У цьому стані локомотиви очікують, коли буде здійснено завантаження або вивантаження вантажів. Це може залежати від наявності необхідних ресурсів, таких як вагони і вантажі.

Перехід «cargo operations started» (початок вантажних операцій) означає, що почалося навантаження або розвантаження. Цей перехід активується, коли локомотиви перебувають у позиції очікування, і всі необхідні умови виконання операції виконані. Під час активації переходу починається фактичний процес завантаження або розвантаження, що може включати взаємодію з працівниками та використання спеціалізованого обладнання.

Завершення операцій фіксують через перехід «cargo operations ended» (закінчення вантажних операцій), що сигналізує про завершення процесу завантаження або розвантаження.

Після завершення операцій локомотиви повертаються до позиції «loco returns» (локомотив повертається). Це завершує один із циклів взаємодії і дає змогу локомотивам готуватися до наступного завдання. Важливо, що з управлінням порядком виконання переходів у системі передбачені різні пріоритети, такі як P_HIGH, P_NORMAL і P_LOW, щоб оптимізувати процеси залежно від поточних умов і важливості операцій.

Позиція «trainset is ready for withdrawing» (маневровий состав готовий до прибирання) вказує на стан, коли склад готовий до відправлення. Локомотиви, перебуваючи в цій позиції, можуть бути задіяні для подальших операцій, таких як рух до вантажних станцій або виконання маневрів.

Позиція «loco arrived to siding track» (локомотив прибув на під'їзну колію для виконання вантажних операцій).

Система також включає позиції, такі як «shunting train is returning» (маневровий состав повертається), що вказує на завершення маневрового процесу, і «pulling trainset from switchyard» (витягування состава з сортувального парку), що позначає стан, коли состав витягнуто з сортувального парку для подальшого транспортування.

Кожна позиція та перехід у моделі створюють чітку структуру, що дає змогу детально аналізувати динаміку системи, виявляти вузькі місця та оптимізувати процеси транспортування та обробки вантажів на залізничній станції.

Проведено моделювання обсягом у декілька десятків тисяч ітерацій, під час якого, зокрема, проаналізовані параметри роботи маневрових локомотивів поза межами підсистеми місцевої роботи, тобто вилучення маневрових локомотивів із підсистеми, адже розглядали модель роботи сортувальної станції, на якій не виділено окремі маневрові локомотиви для обслуговування підсистеми місцевої роботи. Тобто маневрові локомотиви не є спеціалізованими і виконують маневри не лише в підсистемі місцевої роботи, але й всі інші маневрові операції, наприклад у підсистемі розформування/формування. Технічні результати моделювання наведені на рис. 3.

Результати симуляції демонструють основні характеристики моделі, такі як досяжність усіх маркувань, обмеженість кількості маркерів у місцях (наприклад до 300 у «Queue» і 2 в «Engines») і відсутність «мертвих» переходів. Аналіз також підтверджує, що всі переходи є живими та неупередженими. Середні показники продуктивності включають середню довжину черги (12.3 wag), середній час обробки (2.1 год) і рівень використання локомотивів (74.5 %). Час дослідження простору станів становить 0.45 с, що свідчить про ефективність моделі.

```
State Space Analysis:
-----
- Total nodes: 12
- Total arcs: 27
- Dead markings: 0
- Live transitions: 11/11
- Strongly connected components (SCCs): 1
- Boundedness check: PASSED
  - Max tokens in place "Queue": 59
  - Max tokens in place "Engines": 2
  - Max tokens in place "Access_Track": 1

Reachability Analysis:
-----
- All markings are reachable.
- Initial marking: [Engines: 2, Queue: 0, Access_Track: 1, ...]
- Final marking: [Engines: 0, Queue: 14, Access_Track: 1, ...]

Liveness Analysis:
-----
- No dead transitions detected.
- All transitions are live.
- Transition "Start_Feed" fired: 148 times.
- Transition "Arrive" fired: 473 times.
- Transition "Cargo_Ops_Start" fired: 191 times.

Fairness Analysis:
-----
- Transition "Start_Feed": Impartial
- Transition "Arrive": Impartial
- Transition "Cargo_Ops_Start": Impartial

Performance Metrics:
-----
- Average tokens in "Queue": 12.3
- Average tokens in "Engines": 0.32
- Average processing time: 0.87 hours
- Engine utilization: 74.5%

Invariant Checks:
-----
- Place invariant for "Engines": PASSED (sum of tokens = 2)
- Place invariant for "Queue": PASSED (sum of tokens <= 60)
- Transition invariant for "Start_Feed": PASSED

Simulation Time:
-----
- Total simulation time: 720 hours (30 days)
- Time to explore state space: 0.45 seconds
```

Рис. 3. Технічні результати симуляції процесу функціонування підсистеми місцевої роботи за допомогою моделі на основі кольорової мережа Петрі

На основі даних, отриманих під час моделювання, побудовано залежність середньої кількості місцевих вагонів, що очікують операції подавання (черги), від середньої величини інтервалів часу, на який маневрові локомотиви залишали підсистему місцевої роботи для виконання маневрових операцій на станції (витягування сформованих составів до парку відправлення, виконання операції завершення формування тощо), і стандартного відхилення цієї величини (рис. 4).

Результати моделювання демонструють, що середня довжина черги вагонів, які очікують на подавання залежить не лише від середнього часу виконання операцій маневровим локомотивом на технічній станції (поза підсистемою місцевої роботи), але і стандартного відхилення (а також дисперсії) величини цього часу. Це вказує на те, що непередбачуваність у виконанні операцій (виражена через середньоквадратичне відхилення) суттєво впливає на ефективність роботи системи.

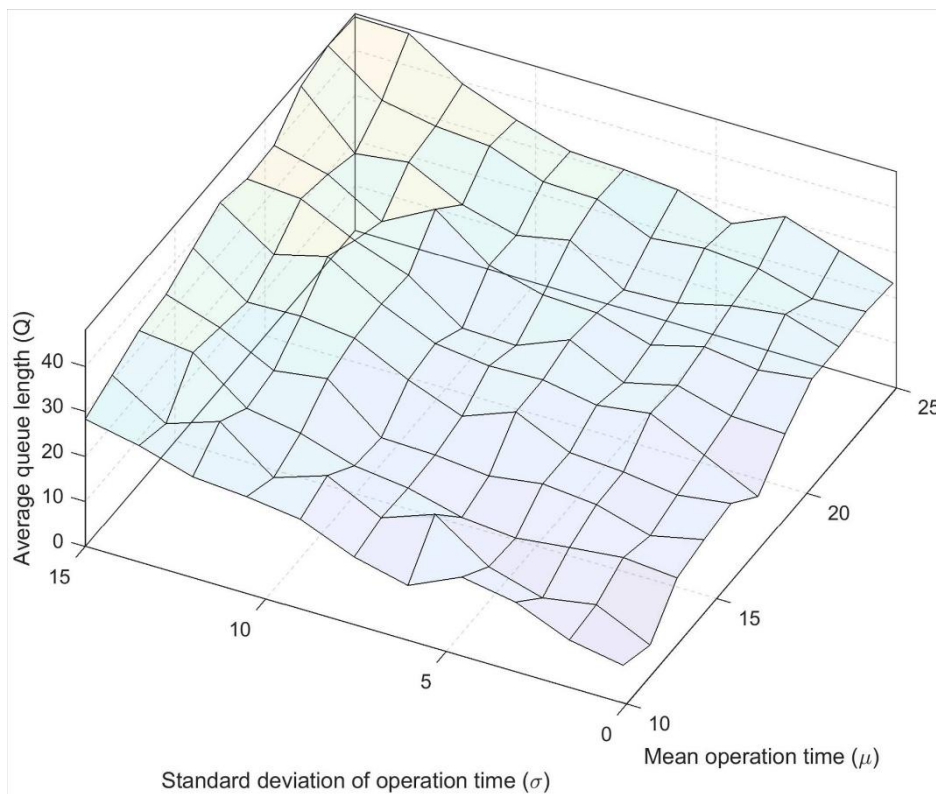


Рис. 4. Залежність середньої довжини черги (кількості місцевих вагонів, що очікують початку операції подавання) від середньої тривалості операції, яку маневровий локомотив виконує поза межами підсистеми місцевої роботи

У першому випадку, коли зростає середній час виконання операцій, збільшення черги є цілком очікуваним: локомотиви витрачають більше часу на виконання операцій поза місцевою роботою, і, як наслідок, у них залишається менше часу для обслуговування місцевих вагонів. Однак другий випадок, коли зростає дисперсія часу виконання операцій, є більш несподіваним.

Збільшення дисперсії часу виконання операцій призводить до значного зростання черги через те, що високий рівень волатильності вносить хаос у систему. Це проявляється в такому:

– *порушення ритмічності процесу.* Високий рівень непередбачуваності призводить до того, що операції виконують нерівномірно. Періодично виникають ситуації, коли операції займають значно

більше часу, ніж зазвичай, що створює «вузькі позиції» у системі.

– *накопичення затримок.* Кожна затримка в одній операції призводить до накопичення затримок у всій системі. Це особливо критично, оскільки локомотиви не встигають компенсувати втрачений час, що призводить до зростання черги.

Висновки. У статті показано, що математичний апарат мереж Петрі, зокрема кольорових мереж Петрі (англ. Colored Petri Nets, CPN), є потужним інструментом для моделювання складних технологічних процесів у залізничних системах. Кольорові мережі Петрі дають змогу враховувати різні кольори об'єктів, такі як вагони, локомотиви та колії, а також їхню взаємодію, що робить їх ідеальним інструментом для аналізу та оптимізації роботи залізничних станцій. Програмне забезпечення CPN Tools є одним

із найкращих інструментів для роботи з кольоровими мережами Петрі, даючи широкі можливості для моделювання, включаючи використання фішок різних кольорів, часових міток і різних законів розподілу для моделювання часових інтервалів. Це дає змогу точно відображувати реальні процеси та аналізувати часові характеристики системи.

Результати моделювання підтвердили коректність моделі, її здатність досягати всіх маркувань і підтримувати обмеження маркерів у місцях. Аналіз показав, що всі переходи є «живими» і неупередженими, що свідчить про стабільність системи.

Продуктивність системи: середня довжина черги – 12,3 ваг, середній час обробки – 2,1 год, рівень використання локомотивів – 74,5 %. Час дослідження простору станів – 0,45 с, що вказує на ефективність симуляції.

Крім того, під час моделювання отримано конкретний нетривіальний і неочікуваний результат – збільшення дисперсії часу виконання операцій призводить до значного зростання черги вагонів, що підкреслює важливість стабілізації процесів.

Основним результатом є встановлення залежності між середньою довжиною черги вагонів і варіабельністю часу, протягом якого маневрові локомотиви залишають підсистему місцевої роботи. Виявлено, що зростання середнього часу операцій

очікувано збільшує чергу, проте зростання дисперсії цього часу має ще сильніший ефект. Висока варіабельність створює хаос у системі, призводячи до порушення ритмічності процесів і накопичення затримок.

Отже, критичним чинником ефективності є не лише середній час виконання маневрових операцій, а і їхня стабільність. Контроль дисперсії може суттєво зменшити ризик виникнення «вузьких місць» і підвищити загальну продуктивність системи.

Отримання такого важливого і нетривіального результату стало можливим завдяки тому, що розроблена модель є комплексним описом процесів, пов'язаних з операціями з місцевими вагонами, а також виконанням маневрових операцій на залізничній станції. Кожна позиція та перехід у моделі створюють чітку структуру, що дає змогу аналізувати динаміку системи та виявляти «вузькі місця» у процесі транспортування та обробки вантажів.

Отже, CPN Tools є потужним інструментом для моделювання та аналізу складних дискретно-динамічних систем. Його використання дає змогу швидко оцінювати ефективність алгоритмів управління, знаходити критичні чинники, що впливають на продуктивність, та оптимізувати процеси на основі отриманих результатів.

Список використаних джерел

1. Waller S. T., & Ziliaskopoulos A. K. A chance-constrained based stochastic dynamic traffic assignment model: Analysis, formulation and solution algorithms. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2006. 14(6). 418–427. doi:10.1016/j.trc.2006.07.002.
2. Shakibayifar M., Sheikholeslami A. & Corman F. A simulation-based optimization approach to reschedule train traffic in uncertain conditions during disruptions. *Scientia Iranica*. 2017. 25(2). 4186. doi:10.24200/sci.2017.4186.
3. Kou L., Fan W. & Song S. Multi-agent-based modelling and simulation of high-speed train. *Computers & Electrical Engineering*. 2020. 86. 106744. doi:10.1016/j.compeleceng.2020.106744.
4. Ghaffari A. & Shafahi M. Modeling and simulation of Railway traffic as a hybrid system. In *2014 8th Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*. 2014. doi:10.1109/SysCon.2014.6819300.

5. Kuzmin D., Baginova V. & Ageikin A. Discrete event simulation model of the railway station. *Transportation Research Procedia*. 2022. 63. 929–937. doi:10.1016/j.trpro.2022.11.091.
6. Liu Y., Zhang L. Modeling and simulation of train movements under scheduling and control for a fixed-block railway network using cellular automata. *SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*. 2013. 89(6). 771-783. doi:10.1177/0037549713487403.
7. Калашнікова Т. Ю., Кравченко Д. О., Звягінцев Я. С. Моделювання процесів взаємодії у роботі підсистем технічної станції між собою та з прилеглими дільницями за умов необхідності зважування вагонів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 164. С. 112–117.
8. Калашнікова Т. Ю., Свиридчук Л. В. Посилення умов взаємодії роботи підсистем технічної станції між собою та з прилеглими дільницями. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2011. Вип. 120. С. 44–47.
9. CPN Tools – A tool for editing, simulating, and analyzing Colored Petri nets. URL: <https://cpntools.org> (Access date: March 2, 2025).

Сергеев Вячеслав Сергійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-7016-3513>.
E-mail: serhieiev_phd@kart.edu.ua.

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Калашнікова Тетяна Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>.
E-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Шандер Олег Едуардович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3330-2588>.

Головко Тетяна Владиславна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7977-9664>.
E-mail: golovko_tv@kart.edu.ua.

Serhieiev Viacheslav, postgraduate student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-7016-3513>. E-mail: serhieiev_phd@kart.edu.ua.

Prokhorov Viktor, Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Kalashnikova Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>. E-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Shander Oleg, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3330-2588>. E-mail: shander@kart.edu.ua.

Golovko Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7977-9664>. E-mail: golovko_tv@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 26.03.2025 р.

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

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

Випуск 211

«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 28.03.2025 р.

Формат паперу А4. Папір писальний.

Умовн. друк. арк. 36,75. 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.