



**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 186*

**Харків 2019**

## **УДК 656.2(062)**

У Збірнику наукових праць УкрДУЗТ відображені матеріали та наукові розробки вчених і спеціалістів залізничного транспорту, наукових установ і промисловості з вирішення сучасних задач та проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Збірник наукових праць УкрДУЗТ призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, студентів і науковців залізничного транспорту та промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті:  
[http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe).

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:** <http://znp.kart.edu.ua>

### **Реферативна база**

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

**ISSN (p) 1994-7852**

**ISSN (online) 2413-3795**

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р.  
Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 6 від 26 вересня 2019 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 21.12.2015 р. №1328 (додаток 8)).

**Редакційна колегія**

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

Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

**Залізничний транспорт (273)**

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

**Будівництво та цивільна інженерія (192)**

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор  
(НУ Львівська політехніка)  
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
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 ХПШ)  
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)  
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professor (Bauhaus-  
Universitet Weimar F.A., Німеччина)  
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Механічна інженерія (131, 132, 133)**

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

**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 (ХНТУСГ)  
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)  
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)  
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Геодезія та землеустрій (193)**

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

**Теплоенергетика (144)**

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)  
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)  
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)  
Володарець М. В., к.т.н., старш. викл. (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

### Транспортні технології (275)

- Запара Я. В., Бауліна Г. С., Москаль М. І., Зайцев В. О., Балагур В. В.*  
Удосконалення роботи пасажирської технічної станції при обслуговуванні швидкісних поїздів 6
- Прохорченко А. В., Ломотько М. Д., Білокудря В. В., Медяник В. В., Полякова В. В.* Формування системи орієнтування пасажирів на платформах залізничних вокзалів України 13

### Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Ромашко О. В., Ромашко В. М.* Розрахунок енергетичного ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій 23
- Волкова В. Є., Шаповал І. В.* Моделювання динамічної поведінки баштової споруди з приєднаним гасником у рівномірному вітровому потоці 31
- Вайнберг О. І.* Методика ймовірнісного оцінювання міцності монолітних залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів ГЕС і ГАЕС в експлуатаційний період 38
- Вировой В. М., Коробко О. О., Закорчемний Ю. О., Уразманова Н. Ф.* Роль активних елементів структури в життєвому циклі будівельних конструкцій 46
- Логвінков С. М., Борисенко О. М., Івашура А. А., Попенко Г. С.* Вапняно-гіпсові в'язучі в технології теплоізоляційних матеріалів системи  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  55

### Геодезія та землеустрій (193)

- Kaminski J. R., Viselga G., Ugnenko Ev., Jasinskas A., Tetsman I., Tymchenko O.*  
The Usage of Board Computers in Tractors 62

### Теплоенергетика (144)

- Круковський П. Г., Дейнеко А. І., Олійник В. С., Склярєнко Д. І.* Моделювання вологісного стану тунелів КП «Київський метрополітен» впродовж календарного року 72

### Залізничний транспорт (273)

- Крашенінін О. С., Сулежко Д. Е., Кузьмін Є. Ю.* Визначення оптимальних запасів ресурсів у локомотивному депо 87

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)**

---

УДК 656.224

**УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТИ ПАСАЖИРСЬКОЇ ТЕХНІЧНОЇ СТАНЦІЇ ПРИ  
ОБСЛУГОВУВАННІ ШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ**

Кандидати техн. наук Я. В. Запара, Г. С. Бауліна,  
магістранти М. І. Москаль, В. О. Зайцев, В. В. Балагур

**IMPROVEMENT OF THE WORK OF THE PASSENGER TECHNICAL STATION IN  
THE SERVICE OF HIGH-SPEED TRAINS**

PhD (Tech.) V. Zapara, PhD (Tech.) H. Baulina, masters M. Moskal, V. Zaitsev, V. Balagur

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186121>

---

*У роботі досліджено тривалість простою составів швидкісних поїздів на станції обігу. Встановлено, що частка простою составів у часі обігу з довжиною ділянки обігу 300–500 км складає від 50 до 70 %. Визначено черговість обробки составів, що поступають на станцію, залежно від заданого розкладу прибуття і відправлення поїздів, технології обробки составів і технічної оснащеності пасажирської технічної станції. Розроблено методику визначення штату бригад стюардів.*

**Ключові слова:** пасажирська технічна станція, швидкісний поїзд, простій состава, метод впорядкування.

*In the work investigated downtime of trains at the station. It is established that the fraction of downtime of the composition with the time of circulation with a length of 300-500 km is 50 to 70 %. To coordinate equally convenient times of arrival and departure of trains at initial and final stations, a conditional classification of high-speed passenger trains by the time of their finding on the route of departure is proposed.*

*The order of processing of the arriving to the station, depending on the set schedule of arrival and departure of trains, the technology of processing of the structures and the technical equipment of the passenger technical station is determined. The solution to this problem reduces the unproductive downtime of the compositions pending processing. The criterion is the minimum of the actual duration of the composition to be treated. When applying the method of ordering the processing of high-speed passenger trains at technical stations according to each of the accepted criteria (in the order of arrival, in the order of departure, in the duration of processing), the idle time can be reduced to 2 hours.*

*With high concentration of early arrival and evening departure of trains, the application of the method of ordering train service depending on the processing time does not lead to the desired result. In this case, it is recommended to arrange the processing of trains in the order of departure of trains, which will not reduce their total downtime at the passenger technical station, but will provide timely preparation of the trains by the time of departure. It is possible to reduce the concentration of early arrival and evening departure of trains by adjusting the timetable and selecting options for linking high-speed passenger trains to general circulation, which will reduce not only the time for processing trains, but also the total total downtime of trains.*

*The method of determining the staff of the flight attendants was developed, depending on the complexity of servicing the different types of cars and the distribution of the flight attendants by the composition involved in the total turnover. The criterion is a minimum of teams of stewards, provided that the time of continuous work of the team does not exceed the standard.*

**Keywords:** passenger technical station, high-speed train, simple staff, ordering method.

**Вступ.** Для сучасної України значення транспорту дуже велике, тому що саме транспорт з'єднує різні регіони в єдину країну. Прагнення до якнайшвидшого подолання відстаней – одна з природних потреб людини. Тому і ведеться боротьба за швидкість на всіх видах транспорту.

Швидкість пересування вантажів і пасажирів – один із ключових показників стану залізниць. Однак будь-який проект будівництва високошвидкісної залізниці є досить капіталомістким заходом. Залежно від природних умов, протяжності маршруту, кількості станцій і вартості трудових ресурсів укладання 1 км такої залізниці може досягати 15 млн дол. США. Висока вартість такої колії і технологічні особливості її експлуатації вимагають поділу колії – окремо для вантажних і пасажирських поїздів, оскільки після вантажоперевезень залізнична колія швидко зношується. Незважаючи на це, більшість країн світу йде на ці витрати, прокладаючи все нові і нові високошвидкісні магістралі.

Швидкісні перевезення дозволяють підвищити комфортність поїздки і транспортну рухливість населення. Безумовно, ринок швидкісних пасажирських перевезень в Україні має хороші перспективи, але йому ще належить пройти певні етапи реформування. Багато питань у сфері залізничних швидкісних пасажироперевезень ще недостатньо вивчено.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних умовах в Україні та інших країнах світу набули розвитку практичні і теоретичні питання щодо організації перевезення пасажирів швидкісними поїздами. Так, робота [1] присвячена формуванню поїздів на високошвидкісній залізничній станції для

покращення пропускної здатності та ефективності її роботи. Проблема маршрутизації поїздів для високошвидкісної залізничної станції сформульована як багатоцільова модель змішаного цілочислового нелінійного програмування, мета якої – мінімізувати відхилення в часі відправлення поїздів і загальний час зайняття всіх маршрутів для максимально збалансованого використання ліній прибуття-відправлення.

У статті [2] запропоновано інноваційну методологію з використанням евристичного алгоритму на основі генерації стовпців, щоб одночасно враховувати потреби в обслуговуванні пасажирів і планування руху поїздів. Такий підхід має потенціал для поліпшення рівня обслуговування та потужності високошвидкісних ліній без додаткових капіталовкладень на побудову нових колій, мостів або тунелів на станційних та магістральних лініях.

У роботі [3] розглянуто особливості розвитку швидкісного руху в Україні та встановлено, що одним із напрямів забезпечення подальшого зростання кількості перевезень є збільшення швидкостей руху пасажирських поїздів. Сформовано цільову функцію експлуатації швидкісних поїздів, яка дозволяє визначити оптимальне значення середньої швидкості руху при безупинному пропусканні швидкісного поїзда з забезпеченням мінімальних витрат на перевезення.

Дослідження, проведені в роботі [4], показали, що ефективність використання швидкісних перевезень залежить від попиту на швидкісні поїзди. У статті пропонується впровадження цих перевезень на тих напрямках, де є велика транспортна рухливість населення в

поєднанні з їхньою платоспроможністю з урахуванням мінімальних експлуатаційних витрат залізниці.

Ефективність перевезення пасажирів під час свят представлена авторами в роботі [5] у вигляді моделі прогнозування нечіткого попиту на пасажирські перевезення, яка може бути застосована для прогнозування попиту на перевезення пасажирів високошвидкісними магістралями. Для залучення більшої кількості пасажиропотоку на високошвидкісних лініях у дослідженні [6] пропонується підвищувати рівень сервісного обслуговування користувачів за допомогою мультимедійних послуг.

Для забезпечення інтеграції високошвидкісних ліній із звичайною залізничною мережею є потреба в залізничних розв'язках. У роботі [7] проведено дослідження з метою розроблення сортувальної станції майбутнього, яка зможе полегшити обмін між високошвидкісною залізницею та звичайною. Розробки та можливості японських і французьких високошвидкісних магістралей проаналізовано в роботі [8].

Визначення місткостей транспортних районів міст за відправленням і прибуттям у роботі [9] запропоновано виконувати на основі даних про пасажиропотоки на швидкісному залізничному транспорті як найбільш об'єктивні і стабільні характеристик транспортного процесу.

Дослідження [10] присвячені формалізації побудови графіка обігу швидкісних поїздів з урахуванням зручного для пасажирів розкладу прибуття та відправлення на початково-кінцеві станції, ритмічної та рівномірної роботи технічних станцій. Використання сформованої моделі, як стверджують автори, дозволило вивільнити рухомий склад і зменшити потребу в колійному розвитку.

Для підвищення конкурентоспроможності швидкісних поїздів Інтерсіті+ автором у статті [11] запропоновано зниження терміну подорожі, оптимізацію

графіка руху швидкісних поїздів і величини тарифів з метою залучення до швидкісних перевезень додаткових пасажирів, розширення мережі швидкісних магістралей по всій території України, впровадження високошвидкісного руху на території України.

Проведений аналіз літературних джерел у сфері експлуатації швидкісних поїздів показав, що виконано значну кількість досліджень, але в них недостатньо розкриті питання, пов'язані з удосконаленням роботи пасажирської технічної станції при обробці швидкісних поїздів.

**Визначення мети та завдань дослідження.** Мета дослідження – удосконалення роботи пасажирської технічної станції на основі визначення черговості обробки составів швидкісних поїздів.

Для досягнення сформульованої мети потрібно вирішити такі завдання:

- дослідження тривалості простою составів швидкісних поїздів на станції обігу;
- визначення черговості обробки составів, що поступають на станцію, залежно від заданого розкладу прибуття і відправлення поїздів, технології обробки составів і технічної оснащеності пасажирської технічної станції;
- розроблення методики визначення штату бригад стюардів.

**Основна частина досліджень.** Кількість пасажирів, які скористалися швидкісними поїздами АТ «Укрзалізниця» у 2018 р. порівняно з попереднім роком зросла на 9 % і становила 5,66 млн осіб. Водночас заповнюваність поїздів склала 99–100 %. Найбільшу кількість пасажирів АТ «Укрзалізниця» перевезла в напрямку Київ-Харків – 1,68 млн. У напрямку Покровська та Запоріжжя – 1,22 млн пасажирів, а в напрямку Львова – 1,14 млн пасажирів.

За весь період курсування швидкісних поїздів Інтерсіті+ та Інтерсіті з травня 2012 р. по теперішній час перевезено понад 22,5 млн пасажирів. Такі поїзди затребувані



серед пасажирів і з кожним роком їх заповнюваність зростає.

В умовах зростання попиту на швидкісні поїзди та водночас обмеженого ресурсу пасажирського рухомого складу доцільно виконати дослідження щодо простою составів на станції обігу.

Визначено, що простій составів швидкісних поїздів на станції Київ-Пасажирський складає від 2 до 31 год, для більшості поїздів цей час перевищує 7 год (таблиця). Також встановлено, що частка простою составів у часі обігу з довжиною дільниці обігу 300–500 км складає від 50 до 70 %.

Таблиця 1

Тривалість простою составів швидкісних поїздів на станції Київ-Пасажирський

Номер поїзда	Напрямок руху швидкісного поїзда	Час простою состава на станції обігу, год
705	Київ-Пшемисль-Київ	6,1
712	Київ-Костянтинівка-Київ	7,1
715	Київ-Пшемисль-Київ	7,7
720/719	Київ-Харків-Київ	2,0
722/721	Київ-Харків-Київ	7,3
724/723	Київ-Харків-Київ	19,4
726/725	Київ-Харків-Київ	5,9
732	Київ-Запоріжжя-Київ	8,2
734	Київ-Покровськ-Київ	4,8
737/738	Київ-Запоріжжя-Київ	18,3
747/748 (через день)	Київ-Тернопіль-Київ	30,7
749	Київ-Івано-Франківськ-Київ	20,8

У цілому простій швидкісних поїздів на станціях обігу і формування складаються з часу на очікування обробки ( $t_{оч.об}$ ), підготовку составів до рейсу ( $t_{техн}$ ) та очікування відправлення ( $t_{оч.відн}$ ). Частка першого й останнього часу в загальному обігу складає для швидкісних поїздів близько 30 %. Такі прості частіше пов'язані зі зручним для пасажирів часом прибуття і відправлення поїздів. Цей час – резерв додаткового використання рухомого складу. Для узгодження однаково зручних часів прибуття і відправлення поїздів за початково-кінцевими станціями запропонована умовна класифікація швидкісних пасажирських поїздів за часом знаходження їх на шляху прямування. Якщо проаналізувати загальний час ходу ( $t_x$ ) поїзда від станції відправлення до станції призначення, то можна розбити швидкісні поїзди, що обертаються на мережі, залежно

від часу знаходження на шляху прямування на дві часові зони:

- 1 зона: поїзди, у яких  $t_x = 4-6$  год;
- 2 зона: поїзди, у яких  $t_x = 6-9$  год.

Наведена класифікація швидкісних пасажирських поїздів є основою для вирішення завдання удосконалення роботи пасажирської технічної станції (ПТС). Завдання полягає у визначенні черговості обробки составів, що поступають на станцію, залежно від заданого розкладу прибуття і відправлення поїздів, технології обробки составів і технічної оснащеності ПТС. Вирішення цього завдання дозволяє скоротити непродуктивний простій составів в очікуванні обробки ( $t_{оч.об}$ ). Критерієм є мінімум фактичної тривалості знаходження состава під обробкою:

$$F_i = t_{техн} + t_{оч.об} + t_{відн} \rightarrow \min . \quad (1)$$

У свою чергу мінімально необхідний час на обробку одного состава буде складати

$$t_{\text{техн}} = \alpha \left( \frac{b_{np}}{n_{np}} + \frac{b_p}{n_p} \right) + t_{\text{ен}}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт суміщення внутрішнього прибирання та ремонту, визначається як відношення мінімально необхідного часу на проведення операцій до загального часу послідовного виконання операцій;

$b_{np}, b_p$  – норма витрат часу на внутрішнє прибирання та поточний ремонт вагонів відповідно, год;

$n_{np}, n_p$  – потреба в працівниках із внутрішнього прибирання та поточного ремонту вагонів відповідно;

$t_{\text{ен}}$  – сумарна тривалість операцій з пропускання вагонів через вагономийний комплекс і приймання складу, що є постійними операціями як за часом виконання, так і кількістю працівників, які беруть участь у їх виконанні, год.

При застосуванні методу впорядкування обробки составів швидкісних пасажирських поїздів на технічних станціях по кожному з прийнятих критеріїв (у порядку надходження, у порядку відправлення, за тривалістю обробки тощо) простій можна скоротити до 2 год. Такий результат досягається, якщо існує пара составів, що ув'язані в загальний обіг, один з яких не встигає обробитися в термін, оскільки раніше з ним виконувалися роботи в неоптимальній послідовності в пізніший час порівняно з відправленням.

Дослідження тривалості простою від кількості швидкісних поїздів, які належать до різних часових зон, показали, що:

- якщо на станції більшість поїздів, що обертаються, належать до 1-ї часової зони, то велика концентрація вранішнього прибуття і вечірнього відправлення, які призводять до неритмічності її роботи. Черговість обслуговування поїздів залежно від часу обробки не призведе до бажаного результату. У цьому випадку рекомендується впорядкування обробки составів у порядку відправлення поїздів, яке не зменшить сумарний простій їх на ПТС, але забезпечить своєчасну підготовку составів до моменту відправлення;

- якщо більшість поїздів, що обертаються на станції, належать до 2-ї часової зони, то, по-перше, можна знизити концентрацію вранішнього прибуття і вечірнього відправлення шляхом коригування розкладу, по-друге, є досить широкі можливості для вибору варіантів ув'язки составів швидкісних пасажирських поїздів у загальний обіг, що дозволить скоротити не лише  $t_{\text{оч.об}}$ , але і загальний сумарний простій составів;

- якщо на станції обертаються поїзди 1-ї і 2-ї часових груп, то при застосуванні всіх перелічених підходів, окрім скорочення непродуктивних простоїв, можна скоротити кількість составів в обігу на кінцевих станціях.

Для вирішення завдання удосконалення роботи пасажирської технічної станції постає завдання визначення штату бригад стюардів, які обслуговують швидкісні поїзди. Тому запропоновано методику визначення штату бригад стюардів залежно від трудомісткості обслуговування різних типів вагонів і розподілу бригад стюардів по складах, ув'язаних в загальний обіг. Критерієм є мінімум бригад стюардів за умови, що час безперервної роботи бригади не перевищує нормативний.

$$\sum_i \sum_j B_{ij} \leq \sum_i \sum_j B_{ij}^{\text{ПФ}}, \quad (3)$$

$$\sum_i T_i^{\text{бр}} = \sum_i (t_{\text{прі}} + t_{\text{сді}} + \theta_i - t_i^{\text{Ф}}) \leq N_{\text{норм}}^{\text{бр}}, \quad (4)$$

де  $\sum_i \sum_j B_{ij}^{1e}$  – штат бригад стюардів, які обслуговують ув'язані состави;

$\sum_i \sum_j B_{ij}^{пФ}$  – штат бригад стюардів які обслуговують состави до ув'язки;

$i$  – кількість схем ув'язки поїздів составами;

$j$  – кількість поїздів у схемі ув'язки;

$T_i^{бр}$  – сумарний час знаходження бригади стюардів у рейсі, год;

$t_{при}$  – час на приймання составів бригадою стюардів, год;

$t_{сді}$  – час на здавання составів бригадою стюардів, год;

$\theta_i$  – час обігу состава за час обслуговування поїздів, год;

$t_i^{\Phi}$  – простій состава на станції формування, год;

$H_{норм}^{бр}$  – нормативний час знаходження бригад стюардів у рейсі, год.

При застосуванні запропонованої методики були отримані такі результати: ув'язка восьми пар поїздів у загальний обіг трьома групами складів дає можливість зекономити чотири состави з 24, що оберталися до ув'язки.

**Висновки.** Досліджено час простою составів швидкісних поїздів на станції обігу, що складає від 2 до 31 год. Встановлено, що для більшості поїздів цей час перевищує 7 год. Частка простою составів за часом обігу з довжиною дільниці обігу 300-500 км складає від 70 до 50 %. Визначено черговість обробки составів поїздів по кожному з прийнятих критеріїв і встановлено, що простій можна скоротити до 2 год.

Запропоновано методику визначення штату бригад стюардів залежно від трудомісткості обслуговування різних типів вагонів і розподілу бригад стюардів по составах, ув'язаних у загальний обіг.

### Список використаних джерел

1. Ziyang F., Chengxuan C., Yutong L., Yaling Z. A Multiobjective optimization for train routing at the high-speed railway station based on tabu search algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. Vol. 2018. 22 pages. DOI 10.1155/2018/8394397.
2. Yue Y., Wang S., Zhou L., Tong L., Saat M. Optimizing train stopping patterns and schedules for high-speed passenger rail corridors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016. Vol. 63, February. P. 126–146.
3. Бауліна Г. С., Левченко В. С. Формування цільової функції експлуатації швидкісних поїздів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 164. С. 222–229.
4. Бауліна Г. С., Богомазова Г. Є., Скубяк А. В. Визначення ефективності використання швидкісних перевезень на мережі залізниць. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 165. С. 5–11.
5. Dou F., Xu J., Wang L., Jia L. A train dispatching model based on fuzzy passenger demand forecasting during holidays. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2013. № 6(1). P. 320–335.
6. Xu S., Zhu G., Shen C., Lei Y., Zhong Z. Analysis and Optimization of Resource Control in High-Speed Railway Wireless Networks. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi Publishing Corporation. 2014. Vol. 2014. 13 p.
7. Abbott D., Varbanov-Marinov M. An event based simulation model to evaluate the design of a rail interchange yard, which provides service to high speed and conventional railways. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2015. Vol. 52. P. 15–39.

8. Palacin R., Raif L., Deniz Ö., Yan N. High speed rail trends, technologies and operational patterns: a comparison of established and emerging networks. *Transport Problems. International Scientific Journal*. 2014. Vol. 9. Special Edition. P. 123–129.

9. Запара В. М., Запара Я. В., Ільєнко В. В., Семенюк Є. О., Червяков В. В. Модель формування системи залізничного швидкісного руху у великих містах на основі визначення попиту на перевезення. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 178. С. 49–58.

10. Запара Я. В., Майоров І. В., Петрів О. В. Оптимізація побудови графіка обігу швидкісних пасажирських поїздів у залізничних вузлах. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 173. С. 5–12.

11. Зайцева І. Ю. Особливості створення на залізницях України мережі швидкісних залізничних магістралей. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2017. № 60. С. 86–93.

---

Запара Ярослав Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-85.

E-mail: y.zapara@gmail.com.

Бауліна Ганна Сергіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-85.

E-mail: baulina777@gmail.com.

Москаль Михайло Іванович, магістрант групи 208-Ім-ОПУТ Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-85. E-mail: Moskal1993@ukr.net.

Зайцев Віктор Олександрович, магістрант групи 202-Ім-ОПУТ Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-85. E-mail: whideshadezayc@gmail.com.

Балагур Володимир Володимирович, магістрант групи 202-Ім-ОПУТ Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-85. E-mail: balagurvladimir@icloud.com.

Zapara Yaroslav, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Freight and Commercial Work, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-85. E-mail: y.zapara@gmail.com.

Baulina Hanna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Freight and Commercial Work, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-85. E-mail: baulina777@gmail.com.

Moskal Mykhailo, Master, Department of Freight and Commercial Work, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-85. E-mail: Moskal1993@ukr.net.

Zaitsev Viktor, Master, Department of Freight and Commercial Work, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-85. E-mail: whideshadezayc@gmail.com.

Balagur Volodymyr, Master, Department of Freight and Commercial Work, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-85. E-mail: balagurvladimir@icloud.com.

Статтю прийнято 03.09.2019 р.

УДК 656.2.072

## ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ОРІЄНТУВАННЯ ПАСАЖИРІВ НА ПЛАТФОРМАХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ВОКЗАЛІВ УКРАЇНИ

Д-р техн. наук А. В. Прохорченко, магістрант М. Д. Ломотько, аспірант В. В. Білокудря, магістранти В. В. Медяник, В. В. Полякова

## FORMATION OF THE PASSENGER ORIENTATION SYSTEM ON THE PLATFORM OF THE RAILWAY STATIONS OF UKRAINE

D. Sc. (Tech.) A. Prokhorchenko, master M. Lomotko, postgraduate student V. Bilokudria, master V. Medianyк, master V. Poliakova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186142>

---

*У роботі запропоновано комплексний підхід до формування системи орієнтування пасажирів на платформах залізничних вокзалів України: секторизація; додаткова інформація змінного і постійного типу; розроблення функцій для мобільного додатка. Для теоретичного обґрунтування запропонованої системи орієнтування в роботі з використанням інструменту імітаційного моделювання AnyLogic проведено моделювання різних сценаріїв посадки пасажирів у поїзди на платформі Харків-Пасажирський. Розроблені додаткові функції для мобільного додатка пасажирів. Це дозволить зменшити дезорієнтацію пасажирів, покращити якість сервісу на вокзалах і підвищить надійність графіка руху поїздів на пасажирських станціях України.*

**Ключові слова:** система орієнтування, залізничний вокзал, пасажиропотік, секторизація, моделювання, мобільний додаток, AnyLogic.

*In The paper proposes integrated approach to the formation of a system of passenger orientation on the platforms of Ukrainian railway stations: sectorization; additional information of variable and constant type; development functions for the mobile app. For the theoretical substantiation of the proposed orientation system in the work using the simulation tool AnyLogic, simulations of different scenarios of boarding of passengers on trains platform Kharkov-Passenger. Additional features for the passenger mobile application have been developed. This will reduce the disorientation of passengers, improve the quality of service at the stations and increase the reliability of the train schedule at the passenger stations of Ukraine. The practical experience application of the above measure in the countries of Western Europe and the countries of Asia has proved his effective. Many scientific works are devoted to the study of building efficient passenger orientation systems at railway stations. These studies are based on research on the theory and practice of navigation (Wayfinding). In the tasks of research it is important to solve the problems of imperfection of information and information support of passengers at the railway stations of Ukraine; improve the quality of passenger service; improve and propose an effective system of functional-time-spatial organization of passenger flows; reduce the impact of inconvenience on passengers on platforms that put them in a stressful state and, as a consequence, reduce the level of danger on station platforms. The higher the level of service, the more passengers will use rail services, but it should be remembered that there should be a balance between increasing the level of service and the number of services and the cost of transporting passengers. Otherwise passenger traffic will not be profitable. Thus, the improvement of the system of orientation of passengers at the railway stations of Ukraine is urgent and requires a decision. Further investigation should*

*investigate the application of the proposed passenger orientation systems to conventional long-distance passenger trains.*

**Keywords:** *system of passenger orientation, train station, passenger traffic, sectorization, modeling, mobile application, AnyLogic.*

**Вступ.** В умовах структурного реформування залізничної галузі України одним із кроків до підвищення прозорості та ефективності АТ «Укрзалізниця» є відмова від перехресного субсидування збиткових пасажирських перевезень за рахунок доходів від вантажних перевезень. У таких умовах діяльність у галузі пасажирських перевезень, зокрема робота пасажирських вокзальних комплексів, має бути виділена в дочірні пасажирські компанії холдингу, головною метою яких буде зменшення державного субсидування і збільшення доходів від власної операційної діяльності. Одним із заходів для збільшення обсягів пасажирських перевезень і, як наслідок, збільшення доходів є підвищення якості сервісних послуг на вокзалах, зокрема удосконалення системи орієнтування пасажирів на платформах залізничних вокзалів України. Практичний досвід застосування зазначеного вище заходу в країнах Західної Європи та Азії довів свою ефективність. На вокзалах АТ «Укрзалізниця» є проблема з орієнтуванням пасажирів як на платформах, так і самих вокзалах. Відсутність системи орієнтування пасажирів підвищує час зупинки поїздів на станціях, особливо на проміжних. Чим вище рівень сервісу, тим більше пасажирів будуть користуватися послугами залізниці, але слід пам'ятати, що між підвищенням рівня сервісу і кількості послуг і ціною на перевезення пасажирів має бути рівновага. В іншому разі пасажирські перевезення не зможуть стати прибутковими. Таким чином, удосконалення системи орієнтування пасажирів на залізничних вокзалах України є актуальною проблемою, яка потребує вирішення. Для удосконалення системи орієнтування пасажирів на залізничних вокзалах України в роботі запропоновано

реалізувати систему орієнтування за такими етапами: розроблення системи секторизації, надання додаткової інформації змінного і постійного типу і розроблення додаткових функцій для мобільного додатка.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням побудови ефективних систем орієнтування пасажирів на залізничних вокзалах присвячено багато наукових праць [1-8]. В основі даних досліджень лежать наукові роботи з теорії і практики навігації (англ. Wayfinding) [2, 3]. Наприклад, у дослідженні [1] наведені перші кроки до впровадження системи орієнтування пасажирів в Україні, приділена увага поділу площі платформи на сектори. У дослідженнях [4-6] наведені вже діючі системи орієнтування пасажирів на станціях Лондона (Велика Британія) і Харміяни (Саудівська Аравія) з урахуванням ергономічних і культурних аспектів цих країн. У роботі [7] доведена ефективність різних варіантів донесення інформації до людей, зокрема за допомогою цифрових ресурсів, що дозволяє охопити більшу кількість людей.

Важливим етапом при удосконаленні систем орієнтування пасажирів на платформах залізничних вокзалів є обґрунтування запропонованих заходів на основі застосування математичного моделювання руху потоків пасажирів. У роботі [8] для перевірки інформаційної системи оповіщення пасажирів застосовано математичну модель на основі агенто-орієнтованого підходу. Для умов роботи залізничних вокзалів України розроблено математичну модель руху пасажирів на основі нечіткої логіки та мультиагентних методів оптимізації [9]. Для математичного моделювання руху пасажирів можуть бути використані дослідження в галузі моделювання натовпу [10]. З огляду на

існуючі дослідження, в даній роботі запропоновано провести математичне моделювання поведінки пасажирів на платформі залізничного вокзалу України.

Для пошуку ефективних заходів з підвищення рівня сервісу необхідно аналізувати досвід залізниць Західної Європи та Азії. Наприклад, у Японії, окрім навісних інформаційних стендів, поширеними є піктограми, нанесені на платформах [11]. У Німеччині на платформах залізничних вокзалів застосовується секторизація (розбиття площі платформи на сектори за алфавітним порядком). Прогресивним і менш витратним заходом з доведення всієї необхідної інформації до пасажирів є використання мобільних додатків. Як приклад можна навести мобільні додатки Transit Planner Norikae Annai, DB Bahnhof Live [12, 13].

Описані вище практики удосконалення системи орієнтувань пасажирів показали свою ефективність у багатьох країнах світу і потребують вивчення та обґрунтування застосування на залізничних вокзалах України.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою даної роботи є дослідження заходів з підвищення якості та безпеки перевезень пасажирів залізничним пасажирським транспортом України на основі удосконалення системи орієнтування пасажирів на залізничних вокзалах в умовах швидкісного або високошвидкісного руху поїздів.

У поставлених завданнях досліджень важливо вирішити проблеми недосконалості довідково-інформаційного забезпечення пасажирів на залізничних вокзалах України; підвищити якість обслуговування пасажирів; удосконалити і запропонувати ефективну систему функціонально-часово-просторової організації пасажиропотоків; зменшити вплив незручностей для пасажирів на платформах, що вводять їх у стресовий стан, і, як наслідок, зменшити рівень небезпеки на платформах вокзалів.

**Основна частина.** Для практичного обґрунтування ефективності системи орієнтування в роботі було проведено польові дослідження маршрутів руху пасажиропотоків на платформі № 2 станції Харків-Пасажирський під час посадки у швидкісний пасажирський поїзд «HRSC2 Hyundai Rotem». Досліджено дві ситуації руху пасажирів платформою (рис. 1): ситуація А – рух пасажирів уздовж платформи від першого до останнього вагона состава пасажирського поїзда; ситуація Б – рух пасажирів на платформі при зміні напрямку руху на протилежну в процесі пошуку вагона.

На рис. 1, а наведена траєкторія руху пасажирів уздовж платформи від першого до останнього вагона состава пасажирського поїзда. На рис. 1, б зображена траєкторія руху, де два пасажирів взагалі помилились з напрямком руху і змінили траєкторію на протилежну, завдавши незручності іншим пасажирам. Наведені вище дослідження траєкторій руху пасажирів підтверджують наявність проблем у пересуванні платформою. У пасажирів відсутня інформація щодо розташування вагонів у схемі поїзда, що призводить до помилкового вибору напрямку руху, скупчення людей, збільшення часу на посадку та дискомфорт пасажирів. Для вирішення досліджених вище проблем руху пасажирів на платформі в роботі запропоновано впровадити на вокзалі Харків-Пасажирський систему орієнтування пасажирів на базі секторизації платформи.

Для зручності пасажирів пропонується розділити залізничну платформу на сектори А, В, С, D, Е. Кожен сектор визначатиме місце зупинки вагонів [1]. Це буде особливо актуально для швидкісних пасажирських поїздів типу «Інтерсіті» та «Інтерсіті+». Технологія передбачає необхідність географічної прив'язки кожної схеми формування пасажирського поїзда до назв секторів платформи. Прийнятним є відповідність



довжини сектора двом пасажирським вагонам – 50 метрів. Схема секторизації платформи на залізничних вокзалах з

прив'язкою до схеми формування пасажирського поїзда «HRSC2 Hyundai Rotem» наведена на рис. 2.

*а*



*б*

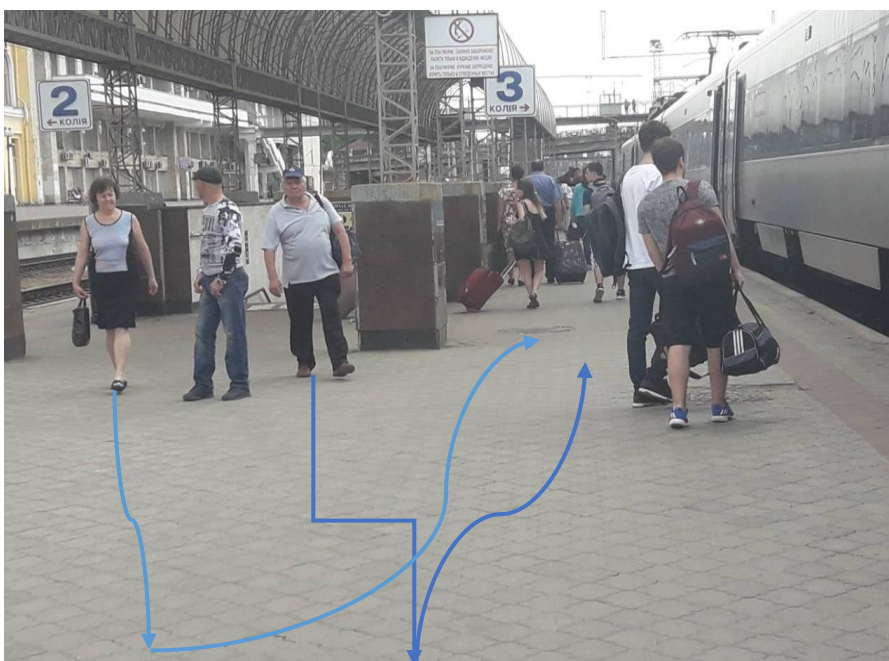


Рис. 1. Візуалізація траєкторії руху пасажирів на платформі № 2 Харків-Пасажирський відповідно до ситуації: *а* – ситуація А – рух пасажирів уздовж платформи від першого до останнього вагона состава пасажирського поїзда; *б* – ситуація Б – рух пасажирів на платформі при зміні напрямку руху на протилежну в процесі пошуку вагона



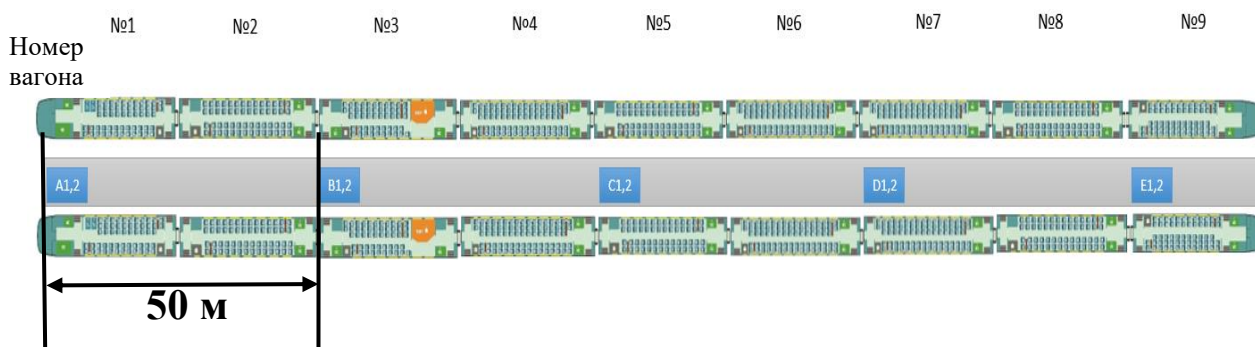


Рис. 2. Схема секторизації платформи на залізничних вокзалах з прив'язкою до схеми формування пасажирського поїзда «HRSC2 Hyundai Rotem»

Застосування запропонованої системи секторизації на платформах (рис. 2) дозволить скоротити час на посадку пасажирів у пасажирський поїзд і зменшити кількість затримок у графіку руху поїздів. Запропоновано дизайн знака, який буде гармонійно вписуватися в інтер'єр платформи (рис. 3). Для підвищення ефективності системи орієнтування

важливо ознайомити пасажирів з прив'язкою схеми состава з секторизацією заздалегідь до виходу його на платформу. Це можливо за рахунок розміщення стендів зі схемами на вокзалі, а також візуалізації схеми на моніторах, що значно пришвидшить посадку пасажирів у вагон, а отже, і зменшить час простою швидкісного пасажирського поїзда на станції.



Рис. 3. Візуалізація знака на платформі № 2 вокзалу Харків-Пасажирський

Для теоретичного обґрунтування запропонованої вище системи орієнтування для платформи № 2 Харків-Пасажирський у роботі застосовано інструмент імітаційного моделювання AnyLogic [14], у межах якого проведено імітацію руху пасажирів на

платформі. На основі отриманих результатів було проведено порівняльний аналіз, який довів адекватність розробленню математичної моделі. Прийнято такі параметри для моделювання: середня швидкість пасажирів – 6 км/год [15], інтенсивність з

кожного виходу – 1000 пас/год; середня площа пасажирів з багажем – 0,4–0,5 м<sup>2</sup>; місткість одного состава пасажирського поїзда «HRSC2 Hyundai Rotem» – 579 пас., в обох поїздах місткість – 1158 пас.

На рис. 4 зображено результати моделювання щільності пасажиропотоку під час посадки в поїзд на платформі № 2 залізничного вокзалу Харків-Пасажирський без системи орієнтування.

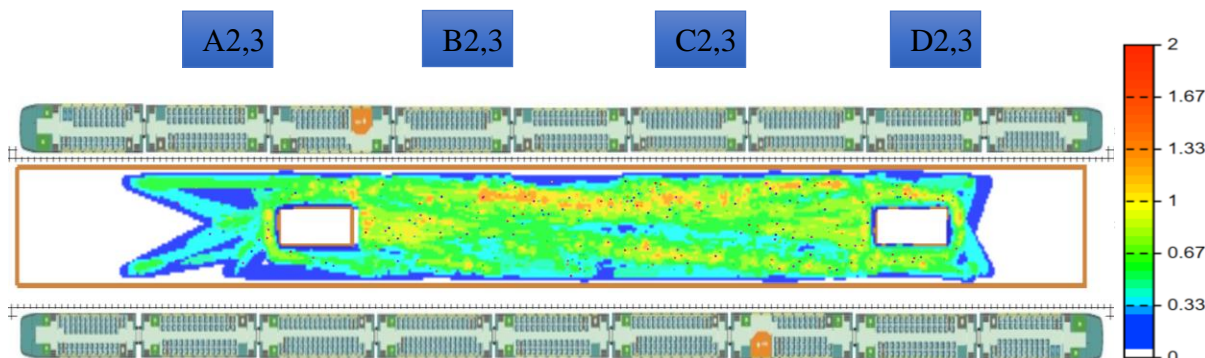


Рис. 4. Моделювання щільності пасажиропотоку під час посадки в поїзд на платформі № 2 залізничного вокзалу Харків-Пасажирський без системи орієнтування

За першим експериментом при моделюванні посадки пасажирів у поїзд без системи орієнтування були задані маршрути руху пасажирів з підземного переходу до поїздів випадково, тобто пасажир міг іти з одного кінця підземного переходу до іншого крайнього входу в поїзд, проходячи весь состав пасажирського поїзда. За рис. 4, аналіз траєкторії руху пасажирів показав значну хаотичність, наявність великої кількості зіткнень пасажирів між собою, що призводить до небезпечних ситуацій. Було отримано такі результати: максимальна щільність пасажирів на платформі 1,33–2 пас/м<sup>2</sup> і більше, на кожному секторі щільність пасажирів без системи орієнтування різна, до сектора «А» і за сектором «D» максимальна щільність невелика (приблизно 1 пас/м<sup>2</sup>), з сектора «А» до сектора «D» максимальна – 1,33–2 пас/м<sup>2</sup>, вся посадка в поїзд зайняла 870 с (14,5 хв).

На рис. 5 наведено результати моделювання щільності пасажиропотоку під час посадки в поїзд на платформі № 2 Харків-Пасажирський з системою орієнтування. У другому сценарії посадки з

системою орієнтування було задано вихід пасажирів з підземного переходу до відповідних секторів, де приблизно зупиниться потрібний вагон для пасажирів, оскільки він заздалегідь вже ознайомлений з системою орієнтування. Пасажири, користуючись системою орієнтування, швидко виконують посадку в поїзд, не зіштовхуються між собою, отже, не виникають різні небезпечні ситуації. Після прибуття поїзда пасажири організовано сідають у потрібний їм вагон згідно з проїзним документом, не проходячи уздовж всього состава поїзда.

За результатами моделювання встановлені області максимальної щільності: максимальна щільність пасажирів на платформі – 1–2 пас/м<sup>2</sup>, місцями щільність доходила до 2 пас/м<sup>2</sup>, а взагалі на кожному секторі максимальна щільність пасажирів із системою орієнтування більш-менш однакова (0,33–1,33 пас/м<sup>2</sup>), вся посадка в поїзд зайняла 685 с (11,42 хв). Результати моделювання доводять, що з системою орієнтування посадка пасажирів приблизно на 27 % ефективніша, аніж без системи орієнтування.

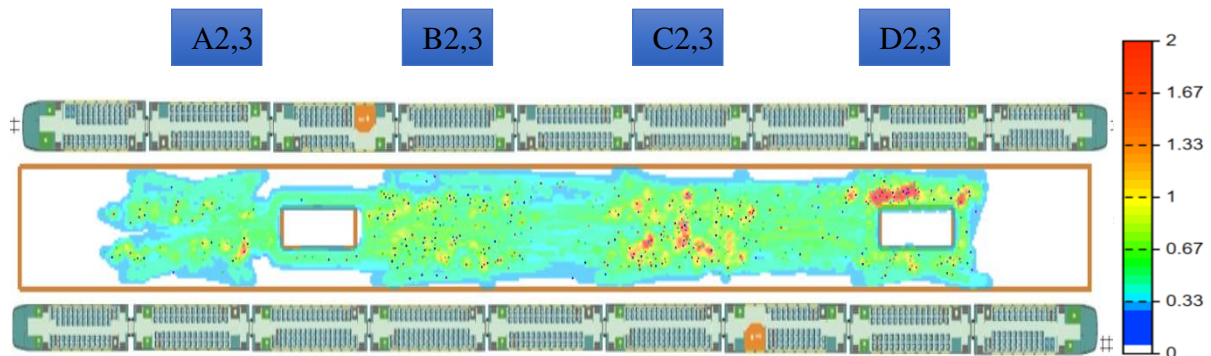


Рис. 5. Моделювання щільності пасажиропотоку під час посадки в поїзд на платформі № 2 Харків-Пасажирський з системою орієнтування

За результатами моделювання, окрім розміщення інформаційних стендів на платформі та приміщеннях залізничного вокзалу, стає важливим питання індивідуального інформування кожного пасажирів. Найбільш дієвим і сучасним способом ознайомлення пасажирів з системою орієнтування на платформах вокзалу є розроблення спеціального додатка для мобільних гаджетів. Інтерфейс додатка для пасажирської компанії України може бути аналогічним прикладам мобільних додатків з Німеччини «DB Bahnhof Live» [12] (рис. 6, а) і Японії «Transit Planner Norikae Annai» [13] (рис. 6, б).

На основі аналізу функцій наведених вище додатків запропоновано удосконалити існуючий мобільний додаток пасажирської компанії АТ «Укрзалізниця» та додати такі функції:

- відображення позиції пасажирів відносно состава пасажирського поїзда та секторів на платформі вокзалу;
- можливість пошуку та відображення результату найбільш прийняттого маршруту для пасажирів з будь-якої локації на вокзальному комплексі до платформи та вагона;
- інформація щодо пасажирського поїзда (дата, час відправлення поїзда, схема вагона та состава тощо);
- функція сповіщення пасажирів про станцію висадки або пересадки в інший

поїзд; додаткові та основні послуги, які доступні в даному поїзді (ціни, меню, температура у вагоні, населеність вагона, погода);

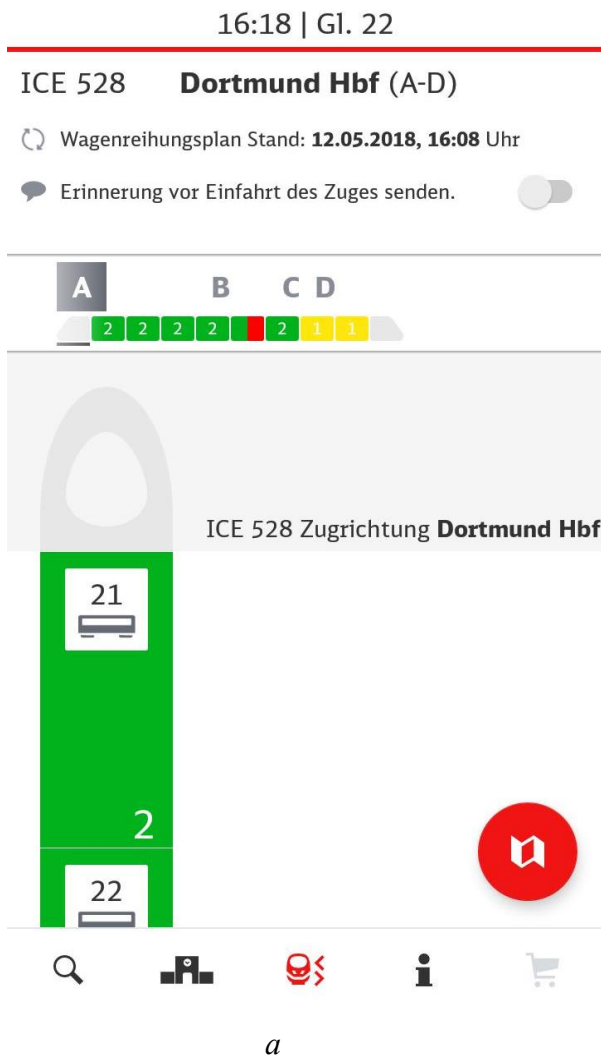
- можливість забронювати готельний номер у пункті призначення.

Майже кожен пасажир потрапляє в ситуацію, коли на незнайомому вокзалі потрібно дуже швидко зорієнтуватися і потрапити на платформу, тому для цього існує функція «можливість знаходження найбільш прийняттого маршруту для пасажирів з будь-якої локації на вокзальному комплексі до платформи та вагона». За цим додатком будуть визначені геодані пасажирів і програма допоможе йому знайти і потрапити до потрібного місця за найкоротшим і зручним маршрутом.

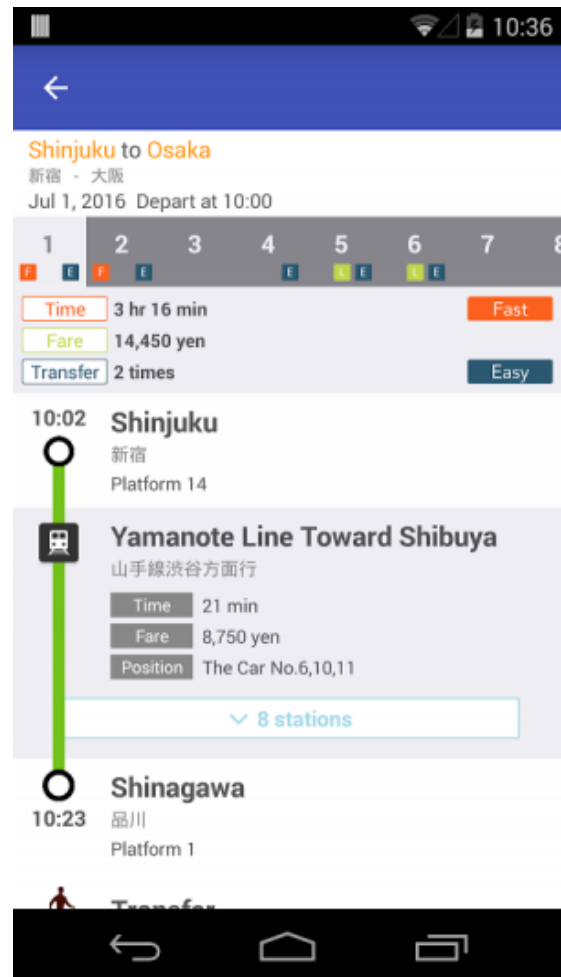
За деякий час до відправлення або вже під час посадки, або вже в поїзді пасажирів буде корисна функція «інформація щодо пасажирського поїзда (дата, час відправлення поїзда, схема вагона тощо)». Ця функція повинна нагадувати пасажирів про день і час поїздки. Під час поїздки для пасажирів, які будуть пересаджуватися в інший поїзд, буде потрібна функція «сповіщення пасажирів про станцію висадки або пересадки в інший поїзд» (за 30 хв до прибуття на станцію призначення). Це дозволить пасажирів відпочити в дорозі, не хвилюючись, що він пропустить свою

зупинку, а також планувати свою подорож на більш далекі відстані з великою кількістю пересадок. Доступність такої інформації в мобільному додатку, як «додаткова і основна інформація на послуги, які доступні в поїзді (ціни, меню, температура в вагоні, населеність вагона, погода)», дозволить дізнатися пасажирів,

яка погода буде на станції призначення і під час прямування поїзда, які переваги він буде мати в поїзді, що він зможе придбати або яку послугу зможе отримати безкоштовно. Щодо можливості забронювати готельний номер через мобільний додаток, то цю функцію високо оцінять пасажирів з інших країн.



*a*



*б*

Рис. 6. Інтерфейс мобільного додатка: *a* – додаток «DB Bahnhof Live», Німеччина; *б* – додаток «Transit Planner Norikae Annai», Японія

Для оцінювання практичної можливості впровадження секторизації платформ на залізничних вокзалах АТ «Укрзалізниця» у роботі проведено техніко-економічне обґрунтування. Виконано порівняльний аналіз існуючої технології роботи

залізничного вокзалу Харків-Пасажирський з удосконаленою, яка передбачає впровадження системи орієнтування пасажирів на двох платформах вокзалу на основі поділу площі платформ на сектори з ув'язкою зі спеціальними діаграмами схем

формування составів швидкісних поїздів, які розміщуються в різних зонах вокзалу. Економічний ефект від впровадження системи орієнтування пасажирів на платформах залізничного вокзалу Харків-Пасажирський порівняно з існуючим варіантом функціонування вокзалу без даної системи орієнтування досягається за рахунок підвищення сервісних послуг пасажиром, що дозволить залучити додаткових пасажирів з автотранспорту і підвищити доходи залізничного вокзалу. Прогнозний економічний ефект з наростаючим підсумком в умовах обслуговування пасажирських поїздів категорії Інтерсіті+ складає 88 494 грн у розрахунку на 5 років за умови приведення витрат і результатів різних років до останнього року. Окупність проекту настає на четвертий рік впровадження системи орієнтування на платформах залізничного вокзалу Харків-Пасажирський.

**Висновки.** На основі аналізу закордонного досвіду розроблена система секторизації, надана додаткова інформація змінного і постійного типу, що дозволить зменшити дезорієнтацію пасажирів і підвищить надійність графіка руху поїздів на пасажирських станціях. Впровадження додаткових функцій для мобільного додатка дозволить АТ «Укрзалізниця» розширити інформаційні послуги для пасажирів. За рахунок запропонованих заходів з формування системи орієнтування пасажирів можливим є за незначні капіталовкладення для АТ «Укрзалізниця» фундаментально змінити якість перевезень пасажирів. У результаті проведення моделювання з системою орієнтування та без системи орієнтування доведено, що система орієнтування приблизно на 27 % зменшує загальну тривалість посадки пасажирів до пасажирських поїздів.

#### Список використаних джерел.

1. Прохорченко А. В., Паламарчук В. В. Удосконалення системи орієнтування пасажирів на залізничних вокзалах України в умовах упровадження швидкісного руху пасажирських поїздів. *Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 169. С. 213–224.
2. Gibson D. *The Wayfinding Handbook: Information Design for Public Places*. Princeton Architectural Press. 1st edition. 2009. 152 p.
3. Golledge G. R. *Wayfinding behavior cognitive mapping and other spatial process*. The Johns Hopkins University Press. Baltimore and London. 1999. 448 p.
4. *Managed Stations Wayfinding. Design Guidelines & Specifications: Technical Specifications by Network Rail, Kings Place 90 York Way London, 2011. 123 p.*
5. *Wayfinding: designing passenger-friendly rail stations with virtual reality. Railway technology: веб-сайт railway technology. URL: <https://www.railway-technology.com/features/wayfinding-designing-passenger-friendly-rail-stations-virtual-reality/>.*
6. Saudi Railways Organisation. *Haramain High Speed Rail Wayfinding Strategy Wayfinding Principles*. HHR-P1P2-S1-A-RP-0003. May 2010. URL: <http://www.renfe.com/docs/SenaleticaEstacionesHHSRFoster.pdf>.
7. Villalobos N. F., Cazorla M. P. *Perception and Wayfinding at Cultural Sites. The International Journal of Visual Design*. 2018. Vol. 12(4). 95 p. Doi: <https://doi.org/10.18848/2325-1581/CGP/v12i04/19-34>.
8. Ahn S.-H., Antonius Bektı J. K., Cheng L.-C., Clark E., Robertson M., Salita R. *Real-time Information System for Spreading Rail Passengers across Train Carriages: Agent-based Simulation Stud. Australasian Transport Research Forum*. 2016. Proceedings 16–18 November 2016. Melbourne, Australia. 13 p.



9. Бутько Т. В., Прохорченко А. В., Журба О. О. Формування моделі організації пасажиропотоків при здійсненні пересадок на залізничному вокзалі з використанням колективного інтелекту. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2006. Вип. 3/2. С. 6–9.
10. Thalmann D., Musse S. R. *Crowd simulation* / London: Springer. – 2007. – 242 p.
11. Ahn Y., Kowada T., Tsukaguchi H., Vandebona U. Estimation of Passenger Flow for Planning and Management of Railway Stations. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. P. 315-330. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.408>.
12. Мобільний додаток «Transit Planner Norikae Annai». Appgrooves: веб-сайт. URL: <https://appgrooves.com/app/japan-transit-planner-norikae-annai-by-jorudan-co-ltd> (Last accessed: 15.08.2019).
13. Мобільний додаток «DB Bahnhof Live». *DB Bahnhof Live*: веб-сайт. URL: [https://www.bahnhof.de/bahnhof-de/ueberuns/db\\_bahnhof\\_live-519228](https://www.bahnhof.de/bahnhof-de/ueberuns/db_bahnhof_live-519228) (Last accessed: 15.08.2017).
14. Borshchev Andrei *The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 6*. Kindle Edition. Amazon Digital Services LLC. 2015. 614 p.
15. ДСТУ 004-201Х: 2017. Пожежна безпека. Загальні положення [Чинний з 2017–07–20]. Вид. офіц. Київ : Національний стандарт України, 2017. 126 с.

---

Прохорченко Андрій Володимирович, д-р техн. наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (067) 799-62-57.

E-mail: [andrii.prokhorchenko@gmail.com](mailto:andrii.prokhorchenko@gmail.com).

Ломотко Микола Денисович, магістрант, група 11-ПМ-ТТ Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (067) 574-83-81. E-mail: [kolyan1890@gmail.com](mailto:kolyan1890@gmail.com).

Білокудря Володимир Валерійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: [uermr@ukr.net](mailto:uermr@ukr.net).

Медняк Вікторія Вікторівна, магістр, група 209-Ім-TEMPUS Українського державного університету залізничного транспорту.

Полякова Вікторія Василівна, магістр, група 209-Ім-TEMPUS Українського державного університету залізничного транспорту.

Prokhorchenko Andrii, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (067) 799-62-57. E-mail: [andrii.prokhorchenko@gmail.com](mailto:andrii.prokhorchenko@gmail.com).

Lomotko Mykola, master, group 11-PM-TT, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (067) 574-83-81. E-mail: [kolyan1890@gmail.com](mailto:kolyan1890@gmail.com).

Belokudrya Vladimir, Senior Lecturer, Department of Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: [uermr@ukr.net](mailto:uermr@ukr.net).

Mednyak Viktoriya, master, group 209-Im-TEMPUS, Ukrainian State University of Railway Transport.

Polyakova Viktoriya, master, group 209-Im-TEMPUS, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 25.09.2019 р.

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)**

---

УДК 624.012.35:620.173/174

**РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОНСТРУКЦІЙ**

Старш. викл. О. В. Ромашко, д-р техн. наук В. М. Ромашко

**CALCULATION OF ENERGY RESOURCE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES**

Senior Lecturer O. V. Romashko, D. Sc. (Tech.) V. M. Romashko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186169>

---

*Здійснено критичний аналіз існуючих методів розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій за строгістю постановки вихідної задачі та способом її розв'язання. Окреслено найважливіші положення універсальної методики розрахунку залишкового енергетичного ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій в умовах тривалої експлуатації. В її основу покладено деформаційно-силову модель опору залізобетону загалом і гіпотезу незмінності в одиниці об'єму і незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента. Зазначену гіпотезу реформовано до енергетичного критерію вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів за різних режимів навантаження.*

**Ключові слова:** залишковий ресурс, залізобетонні елементи, деформаційно-силова модель, енергетичний критерій.

*An effective and scientifically grounded methodology for determining the energy recourse of bearing-strength capacity of reinforced concrete elements and structures in the modernization and reconstruction of construction sites is proposed. It allows you to take into account changes in operational rigidity and formalize the process of assessing the technical condition of construction sites by calculating the residual bearing strength capacity of reinforced concrete elements and structures.*

*The developed methodology is based on the deformation and force model of reinforced concrete resistance in general and the hypothesis of invariance in unit volume and independence from the loading mode of potential energy of reinforced concrete element deformation in particular. In this case, this hypothesis is reformed to the energy criterion of exhaustion of the bearing strength capacity of reinforced concrete elements under different load modes.*

*The methodology for calculating the residual energy resource of buildings and structures has been developed through in-depth analysis of existing similar techniques. It is based on the use of survey parameters that allow direct or indirect evaluation of the elements rigidity. In addition to real defects, damages and mechanical characteristics of materials, this parameter is the deflection of an element or structure, the value of which is determined by survey geodetic, photogrammetric, stereophotogrammetric or any other available methods. The use of the proposed energy criterion in the calculations of the reinforced concrete elements residual life becomes possible even when the initial parameters of field studies are the step and width of the normal cracks opening. In addition,*

*the developed technique allows predicting the operational values of the cracks specified parameters with their level formation, taking into account the adhesion of reinforcement with concrete.*

*The implementation of the proposed method for calculating the residual energy resource of the bearing strength capacity of reinforced concrete elements and structures is possible also in a temporary dimension. This can be done using the concrete creep parameters.*

**Keywords:** *residual resource, reinforced concrete elements, deformation-force model, energy criterion.*

**Вступ.** Зазвичай модернізація та реконструкція будівельних об'єктів потребує не тільки встановлення дійсного технічного стану, але і визначення залишкового ресурсу несучої здатності будівельних конструкцій. Ці завдання є особливо важливими, а для залізобетонних елементів і конструкцій ще й вкрай складними, оскільки пов'язані з суттєвими змінами їхньої експлуатаційної жорсткості. Однак більшість чинних нормативних документів [1-3] подібні зміни повністю ігнорують, а тому технічний стан залізобетонних елементів і конструкцій оцінюється лише за сукупністю виявлених дефектів і пошкоджень без належних формалізованих розрахунків. Причиною такого примітивного підходу до встановлення дійсного технічного стану будівельних об'єктів є відсутність ефективної науково обгрунтованої методики розрахунку залишкового ресурсу несучої здатності будівельних конструкцій. Саме за допомогою такої методики і можна було б формалізувати процес достовірного оцінювання технічного стану будівельних об'єктів за результатами розрахунку залишкового ресурсу несучої здатності залізобетонних елементів і конструкцій.

Очевидно, що загальну універсальність і належну ефективність зазначеній методиці могли б забезпечити:

- обгрунтована модель деформування залізобетонних елементів і конструкцій у реальних умовах тривалої експлуатації;
- відповідні припущення, гіпотези та передумови, необхідні для реалізації зазначеної моделі;
- чіткі критерії настання граничного стану залізобетонних елементів і конструкцій за умов тривалої експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розрахунок залишкового ресурсу будівель і споруд виконують різними методами, що розрізняються між собою, як правило, строгістю постановки вихідної задачі та способом її розв'язання.

За строгістю постановки задачі всі відомі на сьогодні методи оцінювання залишкового ресурсу будівельних конструкцій можна умовно поділити на дві групи.

До першої групи слід віднести детерміновані методи [4-8], що використовуються за недостатньої або обмеженої інформації про конструкцію. За таких обставин залежності з опису функціональних якостей конструкції, переважно у вигляді многочленів середніх ступенів [9], повинні бути достатньо обгрунтовані. При вольовому виборі закону поведінки конструкції, аж до її граничного стану, екстраполяція за певним параметром може призвести не тільки до суттєвих помилок, але й до вкрай важких наслідків.

Другу групу складають імовірнісні методи розрахунку [8, 10, 11], які вимагають значно більшого обсягу детальної інформації не тільки про зовнішні навантаження та впливи, але й властивості матеріалів самої конструкції. Безперечно, внаслідок збільшеного обсягу необхідної інформації суттєво зростає і достовірність самих розрахунків і висновків про надійність і довговічність будівель і споруд. За такого підходу зовнішні умови експлуатації конструкції вважаються випадковими процесами, а розрахунок залишкового ресурсу здійснюється за визначальними параметрами технічного стану. Серед останніх особливу увагу звертають на зміну механічних



характеристик матеріалів, на коефіцієнти запасів міцності і навіть на окремі технологічні показники.

За способом розв'язання поставленої задачі методи розрахунку залишкового ресурсу будівельних конструкцій теж можна умовно поділити на дві групи.

Першу групу формують методи розрахунку залишкового ресурсу за критеріями граничних станів [5, 12, 13, 14] при забезпеченні коефіцієнтів запасу конструкцій. Вони ґрунтуються на відстеженні та екстраполяції параметрів технічного стану конструкцій, аж до досягнення їхніх граничних значень. Сама методика розрахунку потребує достовірної інформації про технічний стан окремих елементів конструкції та обов'язкового виконання перевірок розрахунків з урахуванням виявлених дефектів, пошкоджень і дійсних властивостей матеріалів.

До другої групи необхідно віднести ті методи, що ґрунтуються на моделюванні напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій числовими методами [15, 16, 17] за допомогою різних програмних комплексів. Дефекти і пошкодження включно з тріщинами, встановлені за результатами натурних обстежень, моделюють шляхом зміни характеристик жорсткості елементів за допомогою методу скінченних елементів. Імовірні зусилля в «елементах посилення» визначають з урахуванням зміни характеристик жорсткості чи введення до розрахункової схеми додаткових елементів. Перспективність таких методів підтверджується результатами системних досліджень, виконаних у провідних науково-дослідних інститутах і технічних університетах України [15].

Таким чином, в основу всіх вказаних методів розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій закладаються силові або деформаційні критерії [3]. Але в основу універсальної методики подібних розрахунків слід було б покласти деякий комплексний

деформаційно-силовий (енергетичний) критерій.

**Мета та завдання досліджень.** Дані дослідження спрямовані на розроблення методики розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій за енергетичним критерієм деформування. Зазначена методика має стати універсальною завдяки залученню до неї:

- узагальненої деформаційно-силової моделі опору залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам [18];
- загальноновизнаної системи співвідношень механіки деформованого твердого тіла (МДТТ);
- визначальних гіпотез нелінійності жорсткості та граничної рівноваги;
- особливого енергетичного критерію деформування залізобетонних елементів і конструкцій.

**Основна частина досліджень.** Найважливіші силові і деформаційні параметри деформування залізобетонних елементів на всіх етапах пов'язуються між собою функцією жорсткості  $D = M / (1/r)$ . Тому доцільно, щоб методика розрахунку їхнього залишкового ресурсу базувалася на використанні саме тих параметрів натурних досліджень (обстежень), які дозволяли б безпосередньо чи опосередковано оцінювати жорсткість елементів. Крім реальних дефектів, пошкоджень і механічних характеристик матеріалів, таким параметром може слугувати прогин елемента чи конструкції  $f_l$ , величину якого можна визначити при обстеженні геодезичним, фотограмметричним, стереофотограмметричним чи іншим способом. За величиною прогину можна доволі легко визначити осереднену кривину згинального елемента в експлуатаційній стадії (рисунок):

$$1/r_{f_l} = f_l / (s \cdot l^2), \quad (1)$$

де  $s$  – коефіцієнт, що залежить від схем завантаження та закріплення елемента;

$l$  – розрахункова довжина залізобетонного елемента.

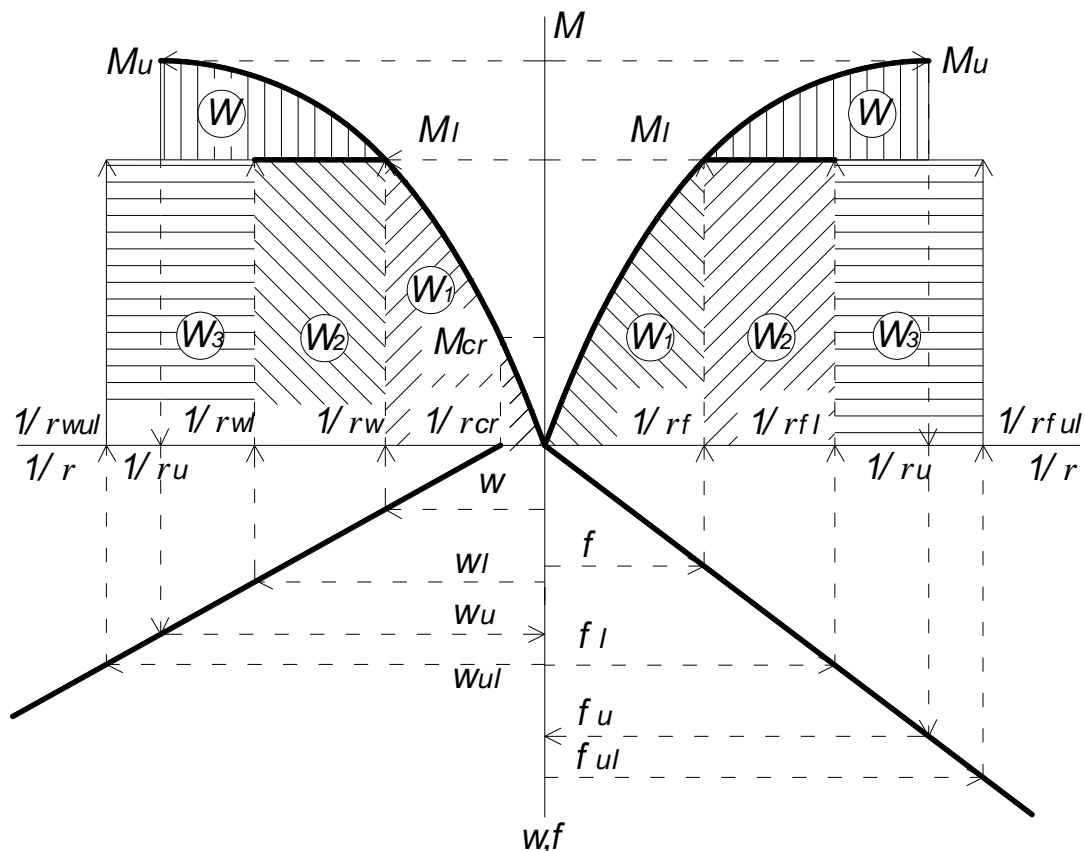


Рис. Визначення потенціальної енергії деформування згинального залізобетонного елемента за дії навантажень різної тривалості

Початкове значення осередненої кривини в розрахунковому перерізі згинального залізобетонного елемента в

експлуатаційній стадії можна визначити, виходячи з узагальненої діаграми його стану [18]

$$M = \frac{D_0 \cdot 1/r - M_u \cdot ((1/r)/(1/r_u))^2}{1 + (D_0/M_u - 2/(1/r_u)) \cdot (1/r)}, \quad (2)$$

за виразом:

$$\frac{1}{r_f} = \frac{1/r_u}{2M_u} \left[ \left(1 - \frac{M_l}{M_u}\right) \frac{D_0}{r_u} + 2M_l - \sqrt{\left(\left(1 - \frac{M_l}{M_u}\right) \frac{D_0}{r_u} + 2M_l\right)^2 - 4M_l \cdot M_u} \right], \quad (3)$$

де  $1/r_u$  – граничне значення кривини залізобетонного елемента при вичерпанні ним несучої здатності;

$M_u$  – несуча здатність цього ж елемента (максимальне зусилля в ньому при настанні граничного стану);

$M_l$  – згинальний момент від експлуатаційного навантаження;

$D_0$  – значення повної початкової жорсткості залізобетонного елемента.

Визначальні параметри граничного стану  $M_u$  та  $1/r_u$  розраховують згідно з деформаційно-силовою моделлю опору

залізобетонних елементів і конструкцій та основних положень МДТТ за системою рівнянь

- статичних  $M = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s)$ ,  $N = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s)$ ;
- геометричних  $1/r = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s)$ ;
- фізичних (стану матеріалів)  $\sigma_c = f(\varepsilon_c)$ ,  $\sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct})$ ,  $\sigma_s = f(\varepsilon_s)$

} (4)

з доповненням її аналітичною залежністю діаграми стану залізобетонного елемента  $M - 1/r$  та функцією граничних деформацій стиснутого бетону  $\varepsilon_{cu} = f(\varepsilon_{si}, \rho_{li}, x_{si}, m_h, m_b)$  [18].

Тоді потенціальну енергію граничного деформування згинального залізобетонного елемента за короткочасної дії повного навантаження (рисунок) можна обчислити за таким виразом:

$$\begin{aligned}
 W &= \int_0^{1/r_u} M d(1/r) = \int_0^{1/r_u} \left[ \left( D_0 \cdot (1/r) - \frac{M_u}{(1/r_u)^2} \cdot (1/r)^2 \right) / \left( 1 + (K-2) \frac{(1/r)}{(1/r_u)} \right) \right] d(1/r) = \\
 &= -\frac{M_u \cdot (1/r_u)}{2 \cdot (K-2)} + \frac{M_u \cdot (1/r_u) \cdot (K-1)^2}{(K-2)^2} - \frac{M_u \cdot (1/r_u) \cdot (K-1)^2}{(K-2)^3} \ln(1 + (K-2)) = \\
 &= \frac{M_u \cdot (1/r_u)}{(K-2)} \left[ -\frac{1}{2} + \frac{(K-1)^2}{(K-2)} - \frac{(K-1)^2}{(K-2)} \ln(K-1) \right], \tag{5}
 \end{aligned}$$

де  $K = D_0 \cdot (1/r)_u / M_u$  – характеристика граничної деформативності залізобетонного елемента.

Аналогічно визначимо потенціальну енергію деформування згинального залізобетонного елемента за короткочасної дії експлуатаційного навантаження (рисунок)

$$\begin{aligned}
 W_1 &= \int_0^{1/r_f} M d(1/r) = \int_0^{1/r_f} \left[ \left( D_0 \cdot (1/r) - \frac{M_u}{(1/r_u)^2} \cdot (1/r)^2 \right) / \left( 1 + (K-2) \frac{(1/r)}{(1/r_u)} \right) \right] d(1/r) = \\
 &= \frac{M_u \cdot (1/r_f)^2}{2(1/r_u) \cdot (K-2)} + \frac{M_u \cdot (1/r_f) \cdot (K-1)^2}{(K-2)^2} - \frac{M_u \cdot (1/r_u) \cdot (K-1)^2}{(K-2)^3} \ln \left( 1 + (K-2) \frac{1/r_f}{1/r_u} \right) = \\
 &= \frac{M_u}{(K-2)} \left[ -\frac{(1/r_f)^2}{2 \cdot (1/r_u)} + \frac{(1/r_f) \cdot (K-1)^2}{(K-2)} - (1/r_u) \cdot \left( \frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln \left( 1 + (K-2) \frac{1/r_f}{1/r_u} \right) \right], \tag{6}
 \end{aligned}$$

та за тривалої дії експлуатаційного навантаження (рисунок)

$$W_2 = M_l \cdot (1/r_{fl} - 1/r_f). \tag{7}$$

З урахуванням виразів (5)-(7) потенціальна енергія деформування згинального залізобетонного елемента, що

відповідає його залишковому ресурсу, може бути визначена за виразом (рисунок)

$$W_3 = W - W_1 - W_2 = \frac{M_u \cdot (1/r_u)}{(K-2)} \left[ -\frac{1}{2} + \frac{(K-1)^2}{(K-2)} - \left( \frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln(K-1) \right] - \frac{M_u}{(K-2)} \left[ -\frac{(1/r_f)^2}{2 \cdot (1/r_u)} + \frac{(1/r_f) \cdot (K-1)^2}{(K-2)} - (1/r_u) \cdot \left( \frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln \left( 1 + (K-2) \frac{1/r_f}{1/r_u} \right) \right] - M_l \cdot (1/r_{fl} - 1/r_f) = M_l \cdot (1/r_{ful} - 1/r_{fl}), \quad (8)$$

де  $1/r_{ful}$  – граничне значення кривини елемента при вичерпанні ним несучої здатності за тривалої дії навантажень.

Таким чином, розрахунок залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій за деформаційно-силовою моделлю пропонується виконувати з залученням ще однієї визначальної гіпотези – незмінності в одиниці об'єму та незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента, витраченої на його руйнування  $W = const$ . Ця гіпотеза одночасно слугує ще й енергетичним критерієм розрахунку залишкового ресурсу в пропонованій методиці та дозволяє реалізувати його в часовому вимірі.

Розрахунок залишкового ресурсу залізобетонного елемента в часовому вимірі пов'язаний зі зміною в часі жорсткості його перерізу загалом та січного модуля деформацій бетону, зокрема

$$E_{cl} = E_{cc} / (1 + \varphi(t, t_0)), \quad (9)$$

де  $E_{cc}$  – січний модуль деформацій бетону за короткочасної дії зовнішнього навантаження [19];

$\varphi(t, t_0)$  – коефіцієнт повзучості бетону за тривалої дії зовнішнього навантаження, граничне значення якого розраховують або приймають згідно з чинними нормами [3, 20].

Використання пропонованого енергетичного критерію в розрахунках залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій стає можливим навіть тоді, коли вихідним параметром натурних досліджень буде слугувати не прогин  $f_l$ , а крок  $s_{r,l}$  і ширина розкриття  $w_l$  нормальних тріщин (рисунок). При цьому необхідно зауважити, що запропонована методика дозволяє прогнозувати експлуатаційні значення вказаних параметрів тріщин за їх рівневого утворення [21] з урахуванням зчеплення арматури з бетоном [22]. І стає це можливим завдяки тому, що гіпотеза плоских перерізів дозволяє в осередненому розрахунковому перерізі пов'язати деформації матеріалів з жорсткістю елемента через його кривину:

$$1/r = (\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s1}) / d \quad \text{або} \quad 1/r = (\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{c0}) / h, \quad (10)$$

де  $\varepsilon_{c2}$  – поточні значення відносних деформацій бетону найбільш стиснутої грані;

$\varepsilon_{c0}$  – поточні значення відносних деформацій найменш стиснутої грані бетону (за відсутності розтягу);

$\varepsilon_{s1}$  – поточні значення відносних деформацій найбільш розтягнутої арматури;

$h$  і  $d$  – відповідно загальна та робоча висота перерізу елемента.

Правда, слід зауважити, що точність розрахунку залишкового енергетичного ресурсу залізобетонних елементів за кроком і шириною розкриття нормальних тріщин є дещо нижчою, ніж за прогином.

**Висновки з досліджень та перспективи подальшого розвитку в даному напрямі.** Запропонована методика розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій відрізняється від усіх інших тим, що в її основу покладено:

- деформаційно-силову модель опору залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам;
- гіпотезу незмінності в одиниці об'єму та незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента;
- безпосереднє використання таких вихідних параметрів натурних досліджень (вимірювань), як прогин елемента, крок і ширина розкриття нормальних тріщин;
- можливість її реалізації в часовому вимірі за допомогою параметрів повзучості бетону як в інженерному, так і програмному варіанті.

### Список використаних джерел

1. Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. Київ: Держбуд України, 1999. 153 с. (Інформація та документація).
2. ДБН В.1.2-14-2008. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 43 с. (Національні норми України).
3. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с. (Стандарт України).
4. Самолинов Н. А. Использование неразрушающих методов контроля прочности конструкций при определении остаточного ресурса зданий и сооружений. *Сейсмостойкое строительство, безопасность сооружений*. 2002. № 3. С. 8–10.
5. Шматков С. Б. Расчёт остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений. *Вестник ЮУрГУ: Строительство и архитектура*. 2007. Вып. 5. № 22. С. 56-57.
6. Основы диагностики технических устройств и сооружений / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 445 с.
7. Самигуллин Г. Х. Алгоритм расчета остаточного ресурса производственных зданий и сооружений по значениям параметров технического состояния. *Инновационная наука*. 2016. № 1. С. 124-128.
8. Existing models residual life assessment of structures and their comparative analysis / M. Volkov et al. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165. P. 1801-1805. (Цитується в SCOPUS).
9. Выбор метода расчета остаточного ресурса зданий и сооружений / Акулов А. С. и др. *Научные труды КубГТУ*. 2015. № 10. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/568> (дата звернення: 21.08.2019).
10. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений. Москва: Стройиздат, 1982. 352 с.

11. Суцєв С. П., Самолинов Н. А., Адаменко И. А. Остаточный ресурс конструкций (сооружений) и возможные методы его оценки. *Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. трудов.* 2009. Вып. 8. С. 320–327.
12. Клименко Є. В. Технічний стан будівель та споруд : монографія. Одеса: ОДАБА, 2010. 284 с.
13. Беляев С. М. Расчет остаточного ресурса зданий с учетом запаса несущей способности конструкций. *Вестник СГАСУ: Градостроительство и архитектура.* 2013. № 3(11). С. 22–25.
14. Визначення параметрів залишкового експлуатаційного ресурсу житлових будинків перших масових серій / М. П. Куркін та ін. *Наука і будівництво.* 2014. № 2. С. 28-30.
15. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: зб. наук. статей за 2007-2009 рр. / Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. 709 с.
16. Голоднов А. И., Слюсар Ю. Н. Остаточный ресурс железобетонных балок, эксплуатирующихся в условиях агрессивной среды. *Зб. наук. праць Українського ін-ту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського.* 2013. Вип. 12. С. 110-117.
17. Семиног М. М., Голоднов О. І. Діагностика технічного стану та визначення залишкового ресурсу будівельних конструкцій. *Дороги і мости.* 2009. Вип. 11. С. 285-290.
18. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.
19. Ромашко В. М. Жорсткість та модуль деформацій бетону в деформаційній моделі. *Бетон и железобетон в Украине.* 2007. № 6. С. 2–6.
20. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, December, 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p. (Європейський стандарт).
21. Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ. 2018. Вип. 181. С. 58-65.
22. Ромашко О. В., Ромашко В. М. Щодо оцінювання зчеплення арматури з бетоном. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ. 2018. Вип. 179. С. 92-99.

---

Ромашко Олена Василівна, старш. викл. кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Ромашко Василь Миколайович, д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Romashko Olena Vasylivna, Senior Lecturer, Department of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko Vasyly Mykolayovych, D. Sc. (Tech.), Associate Professor, Head of Department of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Статтю прийнято 05.09.2019 р.

УДК 534.131

**МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ БАШТОВОЇ СПОРУДИ  
З ПРИЄДНАНИМ ГАСНИКОМ У РІВНОМІРНОМУ ВІТРОВОМУ ПОТОЦІ**

Д-р техн. наук В. Є. Волкова, старш. викл. І. В. Шаповал

**NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF A TOWER STRUCTURE  
WITH AN ATTACHED DAMPER IN A UNIFORM WIND FLOW**

D. Sc. (Tech.) V. Volkova, Senior lecturer I. Shapoval

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186175>

---

У статті досліджено динамічну поведінку баштової споруди як без приєднання гасника коливань, так і за його наявності. Виявлено істотний вплив початкових умов на динаміку досліджуваної системи. Чисельне моделювання дозволило отримати часові процеси, спектральні характеристики та побудувати фазові портрети коливань башти. Тестування моделі, перевірка стійкості і підбір параметрів провадилися на базі реалізації моделі засобами системи MatLab. Встановлено, що системи з двома ступенями свободи проявляють нові додаткові патерни фазових траєкторій з більш складною структурою.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, динамічна поведінка, баштова споруда, динамічний гасник коливань (ДГК), вітровий потік, коливання, фазові траєкторії.

*The dynamic behaviour of a tower structure in uniform wind flow both with and without attached pendulum dampers studied in the article. The structural scheme of the tower structure is considered as cantilever rod having a variable cross-section. The base of the rod is rigidly clamped. Two pendulum dampers located in two mutually perpendicular planes are connected to the upper end of the rod. The pendulum damper structure represented by mass connected to the rod by means of elastic coupling and viscous friction damper. The mathematical model of the investigated system was described by system of two non-linear differential equations. The Voigt's hypothesis was adopted for internal inelastic impedance of the rod to simplify the analysis of the dynamic system under study. Such assumption is quite valid due to the small value of the internal resistance with respect to the values of aerodynamic force and viscous friction of the damper.*

*The problems of stability and accuracy in the application of numerical methods for solving non-linear systems of differential equations are at the higher interest for numerical modelling analyzing the peculiarities of the system. It does not make it possible to separate the equation of the system by using the classical method of reducing the order of the system and as a consequence to apply simpler calculation schemes. Model testing allowed us to establish an integration step that provided the necessary system resolution requirements and determined the acceptable ranges of system parameter values. The implementation of the model was carried out by means of the MatLab system. It has extensive possibilities of software tuning and modification of methods of numerical solution of differential equations systems of different types and visualization of results.*

*Numerical simulation made it possible to obtain time histories, spectral characteristics and construct phase portraits of tower oscillations. The analysis of parameter selection in order to prevent the resonance oscillations of the system in the first resonance was performed. The significant influence of initial conditions on the dynamic behaviour of investigated system was revealed. It is established that the phenomena inherent in a non-linear system with one degree of*

*freedom are preserved and for a system with two degrees of freedom. But, more complicated systems exhibit new additional patterns of phase trajectories with more complex structures.*

**Keywords:** numerical simulation, dynamic behavior, tower, pendulum damper, wind flow

**Вступ.** Явища, що спостерігаються при взаємодії споруд і їхніх окремих елементів з потоком повітря, дуже різноманітні. Найбільш відомими є вітровий резонанс, галопінг і бафтинг. Вони мають дуже складний характер і не всі до кінця досліджені. Традиційно припускають, що дія вітру є комбінацією середньосталого тиску і випадкових пульсацій, викликаних турбулентністю вітрового потоку. Така ідеалізація механізму взаємодії споруди з вітровим потоком дозволяє прогнозувати і дослідити основні аеродинамічні ефекти і не викликає додаткових обчислювальних труднощів.

Дана робота присвячена дослідженню динамічної поведінки баштової споруди з приєднаним гасником. Розрахункова схема баштової споруди розглядається у вигляді консольного стрижня, що має змінний поперечний переріз. Основу стрижня жорстко защемлено. До верхнього кінця стрижня приєднані два гасники коливань, розташованих у двох взаємно перпендикулярних площинах. Гасник коливань являє собою масу, приєднану до стрижня за допомогою пружного зв'язку і демпфера в'язкого тертя. Математична модель об'єкта досліджень – це система двох нелінійних диференціальних рівнянь. Для спрощення аналізу досліджуваної динамічної системи внутрішній непружний опір стрижня враховувався за гіпотезою Фойгта. Таке припущення цілком справедливе, зважаючи на малість величини внутрішнього опору відносно величин аеродинамічної сили і в'язкого опору гасника.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Конструкції і теорія лінійних гасників коливань добре відомі і широко представлені в літературних джерелах [1]. На жаль, такі пристрої використовуються для гасіння вимушених коливань тільки у

вузькому частотному діапазоні. Ефективність ДГК залежить від відношення його маси  $m$  до величини  $M$ , так званої головної маси, і підвищується. Нелінійні гасники коливань є ефективними в більшому частотному діапазоні [2-5]. Робота системи з таким гасником розглядається в роботі [6], де також представлені їхні різні конструкції. Віброударний гасник з одним ступенем свободи для гасіння вимушених коливань запропонований у роботі [7]. У статті [8] показано, що нелінійний гасник зменшує амплітуди коливань у широкому діапазоні частоти вимушених коливань. Процеси перекачування енергії до істотно нелінійного гасника досліджуються в роботі [9]. Динаміка систем з обмеженим збуренням у резонансі була вперше аналітично описана В. О. Кононечком [11]. Пізніше дослідження динаміки неідеальних систем були викладені в різних публікаціях, зокрема в статтях [10, 12]. Відомо, що використання динамічних гасників коливань дозволяє істотно зменшити амплітуди резонансних коливань.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета полягає в дослідженні динамічної поведінки баштової споруди за наявності динамічних гасників коливань маятникового типу. Для досягнення поставленої мети виконано такі завдання: розроблено чисельну модель баштової споруди, проведено тестування системи та перевірку її стійкості, досліджувався вплив окремих параметрів на динамічну поведінку баштової споруди.

**Основна частина дослідження.** Коливання стрижня з приєднаним маятниковим гасником у рівномірному вітровому потоці описуються системою диференціальних рівнянь у частинних похідних



$$\begin{cases} \left(1 + \gamma_0 \frac{\partial}{\partial t}\right) \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI_x \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) \right] + m_x \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - q_x + \delta(x-l) m_1 \frac{\partial^2 (y + \omega_l)}{\partial t^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 (y + \omega_l)}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial y}{\partial t} + f_0^2 y = 0 \end{cases} \quad (1)$$

де  $m_x, EI_x, \gamma_0$  – погонна маса, згинальна жорсткість і коефіцієнт в'язкого опору стрижня;

$m_1, \mu, f_0$  – маса, коефіцієнт в'язкого опору і парціальна частота коливань маятникового гасника;

$\omega, \omega_l$  – переміщення стрижня в довільному перерізі  $x$  і в перетині  $x = l$ ;

$y$  – відносне переміщення маятникового гасника, що дорівнює подовженню його пружного зв'язку;

$q_x$  – аеродинамічна сила, що діє на стрижень;

$\delta(x-l)$  – дельта функція Дірака.

Величина аеродинамічної сили  $q_x$ , що входить до системи рівнянь (1), нелінійно залежить від швидкості вітрового потоку

$$q_x = 0.5 C_x \rho h_x V_x^2, \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина повітря;

$h_x$  – поперечний розмір стрижня;

$V_x$  – величина швидкості вітрового потоку, що залежить від координати перетину стрижня  $x$ .

Величина коефіцієнта  $C_x$ , за експериментальними даними, залежить від форми поперечного перерізу стрижня і може бути подана у вигляді полінома

$$C_x = \sum_{j=1,3,\dots} (-1)^{(j-1)/2} A_j \left( \frac{\omega}{V_x} \right)^j. \quad (3)$$

У виразі (3) величина  $A_j$  характеризує форму поперечного перерізу стрижня. Обмежившись двома членами полінома (3), з рівняння (2) отримаємо

$$q_x = - \left[ A_1 \left( \frac{\omega}{V_x} \right) + A_3 \left( \frac{\omega}{V_x} \right)^3 \right] \rho h_x V_x^2 = -A_1 \omega \rho h_x V_x + A_3 \frac{\omega^3}{V_x} \rho h_x. \quad (4)$$

При галопуванні баштових споруд частота і форма коливань споруд близькі до частоти і форми коливань основного тону. Тому найбільш цікавими є дослідження умов виникнення автоколивань. Припустимо, що

$$\omega = U_x \lambda(t), \quad (5)$$

де  $U_x$  – перша форма коливань;

$\lambda(t)$  – невідома функція часу.

Для зручності подальших обчислень виконаємо нормування першої форми коливань так, щоб переміщення на верхньому кінці стрижня дорівнювали  $U_l = 1$ , а розподіл швидкості вітрового потоку по висоті стрижня подамо як  $V_x = V v_x$ , де  $v_l = 1$ ,  $V$  – швидкість потоку в перерізі  $l$ .

Застосувавши процедуру Бубнова-Гальоркіна до системи диференціальних рівнянь (1) з урахуванням виразу (5), отримаємо систему звичайних диференціальних рівнянь

$$(1 + \nu)\ddot{\lambda} + \gamma_0\omega_0^2\dot{\lambda} + \omega_0^2\lambda + \nu\ddot{y} - 0,5\rho\left(\dot{\lambda}VA_1c_1 - \frac{\dot{\lambda}^3}{V}A_3c_3\right) = 0, \quad (6)$$

$$\ddot{\lambda} + \ddot{y} + \mu_0\dot{y} + f_0^2y = 0. \quad (7)$$

Тут  $\omega_0$  – частота основного тону коливань стрижня,  $\nu$  – відносна маса гасника, яка дорівнює

$$\nu = m_1 / \int_0^l m_x U_x^2 dx. \quad (8)$$

Значення коефіцієнтів  $c_1$  і  $c_3$  визначаються за формулою

$$c_j = \int_0^l U_x^{j+1} v_x^{2-j} h_x dx / \int_0^l m_x U_x^2 dx. \quad (9)$$

Для багатьох реальних систем сили тертя залежать від швидкості і не залежать від координати. Характер цієї залежності визначається умовами, у яких відбувається рух. У загальному випадку силу тертя можна описати виразом вигляду

$$H(\dot{\lambda}) = \sum \varepsilon_i \dot{\lambda}^i, \quad i = 1, 3, 5, \dots, \quad (10)$$

де  $\varepsilon_i$  – коефіцієнт тертя при  $i$ -му члені ряду.

Зауважимо, що величина сили тертя обертається в нуль при  $\dot{\lambda} = 0$ , тобто за відсутності рухів. Особливістю досліджуваної системи є те, що сили тертя виконують негативну роботу на одних проміжках руху і позитивну на інших. Таким чином, система може мати автоколивальні властивості. Для зручності досліджень було виконано нормування значень параметрів, що є складовими вихідної системи рівнянь.

Доданок  $\nu\ddot{y}$  в рівнянні (6) вносить суттєві складності до вибору схеми

розрахунків і перевірки основних положень, як стійкість, точність і складність. Крім того, вираз (6) є нелінійним по  $\dot{\lambda}$ . Класичний прийом зниження порядку похідних і перетворення системи (6), (7) з двох рівнянь у систему з чотирьох не має ефекту, тому що функції в правих частинах мають перехресні посилання на невідомі значення змінних. Крім того, застосування явних схем розрахунку ставить питання про стійкість рішення та умов, за яких вона може зберігатись. Суттєвим є питання про величину та незмінність кроку інтегрування на всьому інтервалі або його частинах і метод інтегрування. Використання неявних розрахункових схем є обґрунтованим і забезпечує стійкість рішення незалежно від кроку інтегрування. Складність обчислень і необхідність накопичення великої кількості даних знижується за рахунок вибору засобу реалізації моделі, у даному випадку системи MatLab.

Чисельний аналіз виконаний для таких безрозмірних значень параметрів системи:  $\nu = 0,01$ ;  $\omega_0 = 1$ ;  $\gamma_0 = 0,003$ ;  $\rho = 1,2$ ;  $c_1 = 0,3$ ;  $c_3 = 0,6$ ;  $A_1 = 1$ ;  $A_3 = 1$ ;  $\mu = 0,01$ ;  $f_0^2 = 1$ . Для отримання залежності амплітуди коливань стрижня від швидкості вітрового потоку виконується чисельне інтегрування системи диференціальних рівнянь. Оцінювання амплітуд коливань здійснювалося для 8192 точок коливального процесу. Довжина реалізацій становила 200 циклів коливань. З огляду на можливість існування декількох стійких режимів коливань в області основного резонансу інтегрування проводилося у двох напрямках: збільшення швидкості вітрового потоку – «прямий» прохід, зменшення швидкості – «зворотний»

прохід. Швидкість вітрового потоку змінювалася в діапазоні з  $V = 0,1 \dots 10$  кроком  $\Delta V = 0,1$ . Результати розрахунків показані на рис. 1. Гілка 1 відповідає збільшенню швидкості вітрового потоку, а гілка 2 – зниженню.

Аналізуючи поведінку гілки 2, можна відзначити, що встановлення резонансних коливань відбувається при значенні швидкості вітрового потоку  $V = 7$ . Відмінною особливістю досліджуваної

системи є наявність зони багатозначності амплітуд коливань у діапазоні швидкостей вітрового потоку  $V = 4,6 \dots 7$ .

Встановлення резонансних режимів коливань у даному діапазоні визначається виключно початковими умовами. При збільшенні швидкості вітрового потоку амплітуди коливань зростають і досягають максимального значення при критичному значенні швидкості вітрового потоку  $V = 4,6$  (рис. 2).

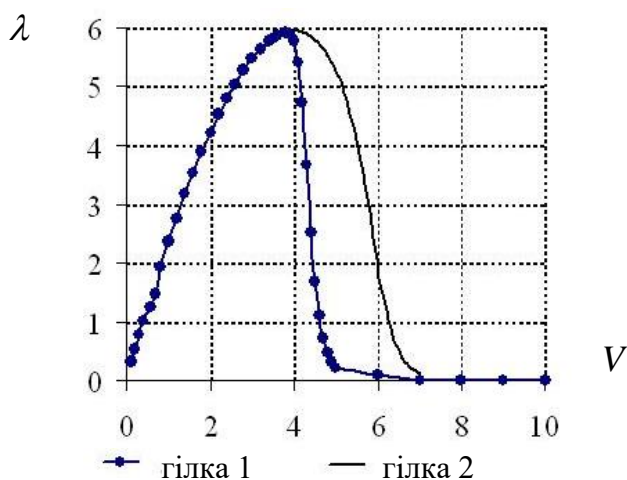


Рис. 1. Залежність амплітуди коливань консольного стрижня від швидкості вітрового потоку за відсутності маятникових гасників коливань

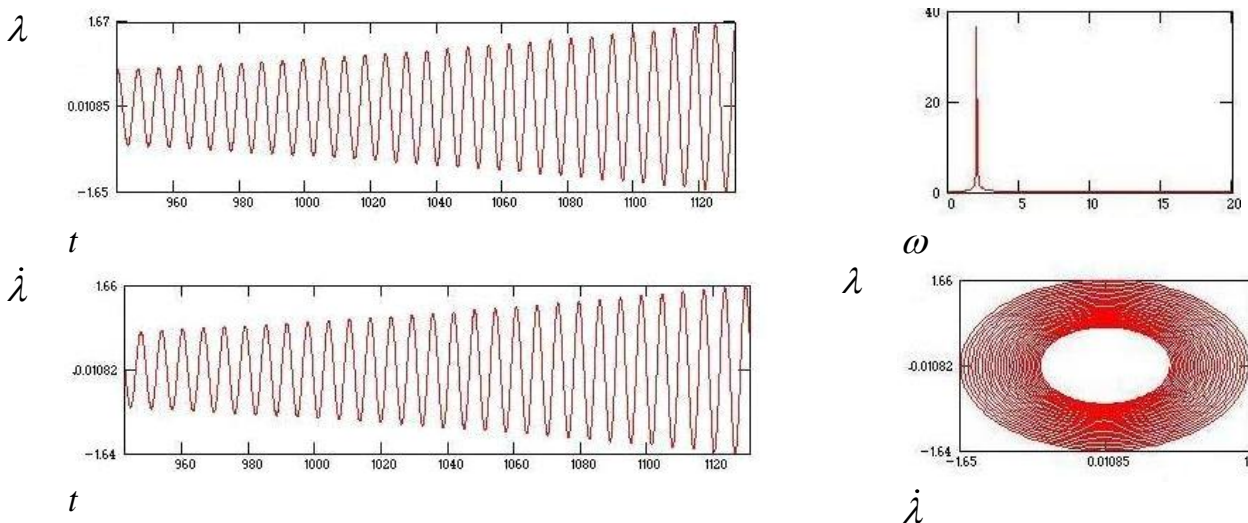


Рис. 2. Часові процеси, спектральні характеристики і фазові траєкторії коливань башти з приєднаним гасником у рівномірному вітровому потоці

На часових процесах цього діапазону спостерігається «розгойдування» системи. При подальшому збільшенні швидкості вітрового потоку амплітуди коливань зменшуються, відбувається перехід на нерезонансну гілку. На перехідних часових процесах спостерігається «зрив» амплітуд

коливань системи. Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок про те, що доцільним є застосування маятникових демпферів з частотами власних коливань, які менше або дорівнюють частоті власних коливань башти  $f_0^2 \leq \omega_0^2$  (рис. 3, а, б).

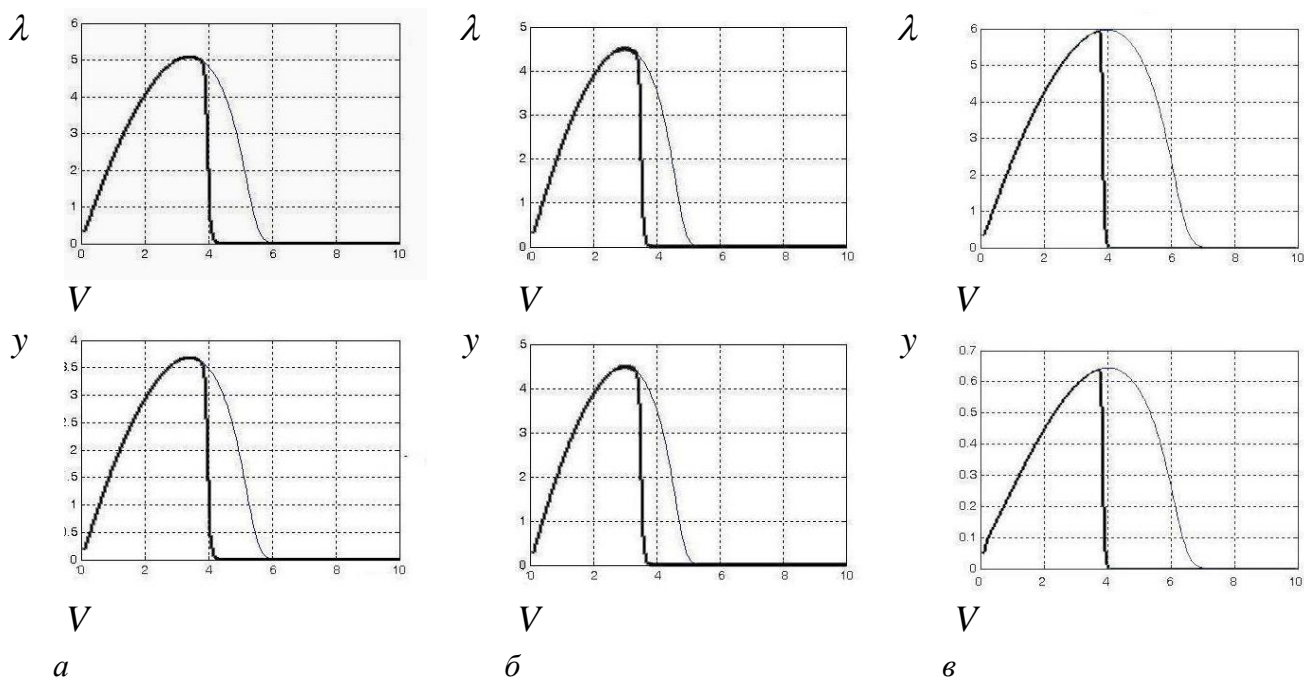


Рис. 3. Залежність амплітуди коливань консольного стрижня з приєднаним маятниковим демпфером від швидкості вітрового потоку: а –  $f_0^2 = 0,5$ ; б –  $f_0^2 = 1$ ; в –  $f_0^2 = 10$

Найбільший ефект зниження амплітуди коливань досягається при  $f_0^2 = \omega_0^2$ . Тут відбувається процес перекачування енергії коливань башти до маятникового демпфера. Амплітуди коливань маятникового демпфера досягають максимальних значень, а амплітуди коливань башти знижуються. Одночасно з цим ширина зони резонансних коливань зменшується. Застосування демпферів, що мають більші частоти власних коливань, ніж частота власних коливань башти  $f_0^2 > \omega_0^2$ , не призводить до істотного зниження енергії коливань башти у вітровому потоці (рис. 3, в).

**Висновки.** Для дослідження динамічної поведінки дисипативної системи з обмеженим збуренням, що містить маятникові віброгасники, використано чисельне моделювання. Для більш детального дослідження поведінки системи в резонансі використана методика приведення до так званої скороченої системи, яка представлена відносно енергії системи, арктангенса відношення амплітуд власних форм коливань до фаз форм коливань. Виявлено, що відбувається перехід енергії від нестійких коливань до стійкої форми коливань, локалізованих на одній з узагальнених координат. У той же час існує форма пов'язаних коливань, яка

реалізується тільки для деякого фіксованого значення енергії вітрового потоку. Деякі траєкторії наближаються до цієї перехідної форми, а потім, коли ця

форма перестає існувати, віддаляються від неї і наближаються до стійкої локалізованої форми коливань.

### Список використаних джерел

1. Каудерер Г. Нелинейная механика. Москва: Изд-во иностр. лит., 1961. 735 с.
2. Avramov K. V., Mikhlin Yu. V. Damping of free elastic vibrations in linear systems. *Internation Applied Mechanics*. 2005. No. 2. P. 203–209.
3. Avramov K. V., Mikhlin Yu. V. Snap-through truss as an absorber of forced oscillations. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. No. 29. P. 705–722.
4. Михлин Ю. В., Решетникова С. Н. Анализ динамического поведения двухмассовой системы при существенно нелинейном виброгашении. *Прикладная механика*. 2005. № 1. С. 102–111.
5. Mikhlin Yu. V., Reshetnikova S. N. Dynamical interaction of an elastic system and essentially nonlinear absorber. *Journal of Sound and Vibration*. 2005. Vol. 283. P. 91–120.
6. Nissen J. C., Popp K., Schmalhorst R. Optimization of a non-linear vibration absorber. *Journal of Sound and Vibration*. 1985. No. 99. P. 149–154.
7. Semecigil S. E., Lammers D., Ying Z. A new tuned vibration absorber for wide-band excitations. *Journal of Sound and Vibration*. 1992. No. 156. P. 445–459.
8. Natsiavas S. Steady state oscillations and stability of non-linear dynamic vibration absorber. *Journal of Sound and Vibration*. 1992. Vol. 156, No. 2. P. 227–245.
9. Gendelman O. V. Bifurcations of nonlinear normal modes of linear oscillator with strongly nonlinear damped attachment. *Nonlinear Dynamics*. 2004. No. 37. P. 115–128.
10. Вибрации в технике / под ред. К. В. Фролова. Москва: Машиностроение, 1995. 456 с.
11. Кононенко В. О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением. Москва: Наука, 1985. 254 с.
12. Civalci O., Civalci O., Ertas A. Pendulum as vibration absorber for flexible structures: experiments and theory. *Trans. of the ASME. Journal of Vibration Acoustics*. 1996. Vol. 118. P. 558–566.

---

Волкова Вікторія Євгенівна, д-р техн. наук, професор кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». E-mail: drvev09@gmail.com.

Шаповал Ірина Вікторівна, старший викладач кафедри комп'ютерні інформаційні технології Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. E-mail: irvksh88@gmail.com.

Volkova Viktorija E., D. Sc. (Tech.), professor, Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology. E-mail: drvev09@gmail.com.

Shapoval Irina, Senior Lecture, Department of Computer Information Technology, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. E-mail: irvksh88@gmail.com.

Статтю прийнято 20.09.2019 р.

УДК 624.196

**МЕТОДИКА ЙМОВІРНІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОБЛИЦЮВАНЬ НАПІРНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ ТУНЕЛІВ ГЕС І ГАЕС В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ ПЕРІОД**

Д-р техн. наук О. І. Вайнберг

**PROCEDURE OF PROBABILISTIC STRENGTH ASSESSMENT OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE LININGS OF HIGH-PRESSURE HYDROTECHNICAL TUNNELS OF HPP AND PSPP DURING THE OPERATIONAL PERIOD**

D. Sc. (Tech) O. Vaynberg

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186343>

*У статті в рамках теорії надійності складних технічних систем розроблено методика ймовірнісного оцінювання міцності монолітних залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів ГЕС і ГАЕС в експлуатаційний період. Запропоновано алгоритм розв'язання поставленої ймовірнісної задачі методом Монте-Карло. На основі запропонованого алгоритму в ПРАТ «Укргідропроєкт» розроблено комп'ютерну програму. Наведено результати розрахунку ймовірності руйнування облицювання підвідного тунелю Дністровської ГАЕС.*

**Ключові слова:** напірний гідротехнічний тунель, залізобетонне облицювання тунелю, ймовірність руйнування, метод Монте-Карло.

*In the article, a methodology for the probabilistic assessment of the strength of monolithic reinforced concrete lining of hydraulic pressure tunnels of HPPs and PSPs during the operational period has been developed within the theory of complex technical systems reliability. Based on the analysis of the available deterministic solution to the problem of stresses in the working annular reinforcement for the considered lining, the coupling equation necessary for solving the probabilistic problem is obtained. The dividing of the parameters included in the coupling equation into random and nonrandom (deterministic) is justified. Recommendations for the selection of distribution functions types, as well as the parameters of these functions for random variables included in the obtained coupling equation are given. An algorithm for solving the posed probabilistic problem by the Monte Carlo method is proposed. Recommendations on the selection of the of statistical tests number that provide sufficient accuracy of the calculation results are given. Based on the proposed algorithm, "Ukrhydroproject" PJSC developed a software As a result of this software operation, the calculated probability of the tunnel lining destruction at the end of the estimated operating life, as well as the annual probability of the tunnel lining destruction, can be obtained. The calculations of the probability of destruction of the reinforced concrete lining of the supplying high-pressure tunnel of the Dniester PSP are carried out. The following results were obtained the probability of destruction of the lining of the tunnel during the estimated service life  $2.42 \cdot 10^{-4}$  and the annual probability of destruction of the tunnel lining is  $0.24 \cdot 10^{-5}$  1/year.*

**Keywords:** pressure hydraulic tunnel, reinforced concrete lining of the tunnel, probability of destruction, Monte Carlo method.

**Вступ.** Згідно з діючими на сьогодні в Україні державним стандартом [1] і будівельними нормами [2, 3] для обґрунтування надійності та безпеки

будівельних конструкцій, будівель і споруд додатково до нормативних проектних розрахунків за методом граничних станів рекомендується виконувати ймовірнісні розрахунки надійності унікальних і особливо відповідальних конструкцій. Такий підхід узгоджується з чинними в Євросоюзі нормами проектування [4].

Досі нема усталених методик, які можна було б використовувати для виконання ймовірнісних розрахунків надійності та безпеки ряду складних і відповідальних конструкцій і споруд. До таких споруд належать напірні гідротехнічні тунелі, які широко застосовуються як станційні водоводи ГЕС і ГАЕС.

У наш час в Україні за проектами ПрАТ «Укргідропроект» будуються високонапірні гідротехнічні тунелі в складі Дністровської ГАЕС та Ташлицької ГАЕС. Передбачено монолітні залізобетонні облицювання цих тунелів. У діючих в Україні нормах проектування гідротехнічних тунелів [5] зазначено, що найбільша небезпека руйнування тунелів з такими облицюваннями пов'язана з втратою міцності облицювань в експлуатаційний період.

Враховуючи високу відповідальність тунелів цих ГАЕС, слід виконати ймовірнісні розрахунки, що обґрунтовують надійність таких тунелів. Для виконання цих розрахунків необхідно створити методику ймовірнісного оцінювання міцності монолітних залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів в експлуатаційний період. У даній статті викладено основні положення методики, розробленої в ПрАТ «Укргідропроект».

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наш час є велика кількість робіт, присвячених ймовірнісному оцінюванню надійності та безпеки гідротехнічних споруд [6-9 та ін.]. У цих роботах у рамках теорії надійності складних технічних систем наведено обґрунтування підходів, які дозволяють виконувати ймовірнісні розрахунки

міцності і стійкості таких гідротехнічних споруд, як бетонні греблі, ґрунтові греблі, будівлі ГЕС, судноплавні шлюзи, стояни та інші підпірні споруди.

Однак до цього часу приділялося недостатньо уваги питанням ймовірнісних розрахунків надійності та безпеки таких важливих і широко поширених споруд, як гідротехнічні тунелі. Існує порівняно невелика кількість робіт, присвячених розгляду даних питань [10, 11 та ін.]. Тому розроблення методики, що дозволяє виконувати ймовірнісні розрахунки надійності та безпеки гідротехнічних тунелів, є актуальним завданням.

При розробленні методики ймовірнісних розрахунків залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів використовувалися основні принципи теорії надійності складних технічних систем, які зазвичай застосовуються в методиках розрахунків інших гідротехнічних споруд. Використовувалися також підходи, викладені в роботі [11], у якій розглядалися сталезалізобетонні облицювання напірних гідротехнічних тунелів.

**Визначення мети і завдань досліджень.** Метою досліджень є розроблення ймовірнісної моделі оцінювання надійності та безпеки залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів в експлуатаційний період.

Для досягнення сформульованої мети необхідно вирішити такі завдання:

– аналіз основних факторів, що впливають на міцність розглянутих залізобетонних облицювань напірних тунелів;

– аналіз існуючих підходів, що використовуються при виконанні нормативних детерміністичних розрахунків міцності розглянутих залізобетонних облицювань напірних тунелів;

– формулювання та обґрунтування основних положень методики ймовірнісних розрахунків надійності та безпеки розглянутих залізобетонних облицювань напірних тунелів;

– розроблення алгоритму розв'язання задачі визначення ймовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного тунелю в експлуатаційний період.

*Основні фактори, які впливають на міцність залізобетонних облицювань напірних тунелів.* У поперечному перерізі напірного гідротехнічного тунелю залізобетонне облицювання являє собою залізобетонне кільце, яке спирається на масив гірських порід, що вміщують тунель. У межах облицювання розміщуються робоча кільцева арматура (зазвичай дворядна) і розподільна поздовжня арматура.

Основним навантаженням на розглянуте облицювання напірного тунелю в експлуатаційний період є внутрішній тиск води. Під дією цього тиску в робочій кільцевій арматурі облицювання тунелю виникають напруження розтягу. Максимальні значення цих напружень мають місце в поздовжніх радіальних перерізах облицювання, які співпадають з тріщинами. Згідно з діючими в Україні нормами проектування [5] міцність робочої кільцевої арматури і, отже, міцність розглянутих залізобетонних облицювань напірних тунелів вважається забезпеченою, якщо максимальні значення напружень у цій арматурі не перевищують гранично допустимих значень.

На міцність залізобетонного облицювання напірного тунелю в експлуатаційний період впливає ряд таких основних факторів:

– інтенсивність внутрішнього тиску води – при збільшенні цього тиску напруження в робочій кільцевій арматурі підвищуються, а міцність облицювання тунелю знижується;

– діаметр тунелю – при збільшенні діаметра тунелю напруження в робочій кільцевій арматурі підвищуються, а міцність облицювання тунелю знижується;

– пружний опір масиву гірських порід, що вміщує тунель, – при збільшенні цього опору напруження в робочій

кільцевій арматурі знижуються, а міцність облицювання тунелю підвищується;

– площа перерізу робочої кільцевої арматури – при збільшенні площі перерізу арматури напруження в ній знижуються, а міцність облицювання тунелю підвищується;

– міцність робочої кільцевої арматури при розтягуванні – при збільшенні цього параметра міцність облицювання тунелю підвищується.

*Нормативні детерміністичні підходи до оцінювання міцності залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів.* Діючі в Україні норми проектування [5] регламентують використання детерміністичних підходів при обґрунтуванні надійності і безпеки гідротехнічних тунелів. Згідно з цими нормами вважається, що міцність залізобетонного облицювання напірного гідротехнічного тунелю буде забезпечена, якщо розрахункові значення напружень у робочій кільцевій арматурі  $\sigma_s$  не перевищують граничного значення  $\sigma_{s,u}$ . Граничне значення  $\sigma_{s,u}$  приймається за нормами проектування залежно від міцності робочої кільцевої арматури, класу відповідальності тунелів, розглянутих розрахункових сполучень навантажень [3, 5, 12].

У нормах проектування [5] наведено порівняно нескладний вираз, що дозволяє визначати необхідну площу перерізу робочої кільцевої арматури  $A_s$  в залізобетонному облицюванні напірного тунелю. Відзначимо, що цей вираз не враховує вплив роботи розтягнутого бетону облицювання на ділянках між тріщинами на деформації робочої кільцевої арматури. Це призводить до деякого завищення несучої здатності залізобетонного облицювання тунелю.

У роботі [13] наведено вираз для визначення необхідної площі перерізу робочої кільцевої арматури  $A_s$ , який отримано в рамках нормативного детерміністичного підходу з урахуванням впливу роботи розтягнутого бетону



облицювання на ділянках між тріщинами. При виконанні розрахунків з використанням цього, порівняно громіздкого, виразу отримують більші значення необхідної площі перерізу арматури  $A_s$  порівняно з розрахунками за нормами проектування [5]. Відзначимо також, що в роботі [13] наведено вираз для визначення розрахункових значень напружень у робочій кільцевій арматурі  $\sigma_s$ .

**Основна частина дослідження.** Як уже зазначалося, міцність залізобетонного облицювання напірного гідротехнічного тунелю визначається одним параметром – міцністю робочої кільцевої арматури, яка розміщена в такому облицюванні. Тому розрахунки ймовірності втрати міцності цього залізобетонного облицювання доцільно виконувати в межах параметричної теорії надійності. При цьому розглядаються такі стандартні етапи розв'язання ймовірнісної задачі в рамках даної теорії надійності [6-8 та ін.].

1. Складання рівняння зв'язку між вхідними (характеристики навантажень, властивостей матеріалів і ґрунтів та ін.) і

вихідними параметрами (результати розрахунку).

2. Підготовка вихідних даних для розрахунку відповідно до прийнятого рівняння зв'язку і розділення вихідних параметрів на випадкові і не випадкові (детерміністичні).

3. Визначення на основі наявної інформації ймовірнісних характеристик випадкових вихідних параметрів.

4. Визначення ймовірності досягнення граничного стану залізобетонного облицювання за умови міцності робочої кільцевої арматури на основі розв'язання відповідної задачі статистичної динаміки.

При складанні рівняння зв'язку, необхідного для розв'язання поставленої ймовірнісної задачі, використовується наведений у роботі [13] вираз для визначення розтягувальних напружень в арматурі  $\sigma_s$ . Цей вираз отримано з урахуванням основних факторів, що впливають на ці напруження, у тому числі з урахуванням впливу роботи розтягнутого бетону облицювання на ділянках між тріщинами. Прийняте рівняння зв'язку має вигляд

$$\sigma_s = \frac{E_s}{E_s \cdot A_s + K_0 \cdot r_s} \cdot \left[ q \cdot r_i + \frac{2}{3} \cdot \frac{K_0 \cdot r_s \cdot R_{bt} \cdot (r_e - r_i)}{E_s \cdot A_s} \right] \leq R_s. \quad (1)$$

У даному рівнянні  $q$  – внутрішній тиск води в тунелі;  $A_s$  – площа перерізу робочої кільцевої арматури;  $r_i$  – внутрішній радіус облицювання;  $r_e$  – зовнішній радіус облицювання;  $r_s$  – радіус осі робочої кільцевої арматури;  $E_s$  – модуль пружності матеріалу арматури (сталі);  $K_0$  – приведений коефіцієнт питомого пружного опору масиву гірських порід, що вміщує тунель;  $R_{bt}$  – міцність бетону облицювання при розтягуванні;  $R_s$  – міцність арматури при розтягуванні.

Внутрішній тиск води в тунелі  $q$  може розглядатися як сума статичного тиску  $q_{st}$ ,

тиску гідравлічного удару  $q_{wp}$ , тиску пульсації потоку води в тунелі  $q_p$ , сейсмічного тиску води в тунелі  $q_s$ , що виникає при землетрусах. Таким чином, можна записати

$$q = q_{st} + q_{wp} + q_p + q_s. \quad (2)$$

При визначенні величин  $q_{st}$ ,  $q_{wp}$ ,  $q_p$ ,  $q_s$  зазвичай використовуються такі підходи [11, 13 та ін.].

Статичний тиск води  $q_{st}$  визначається за загальновідомою формулою гідростатики:

$$q_{st} = \rho_w \cdot g \cdot (Z_w - Z_0), \quad (3)$$

де  $Z_w$  – відмітка рівня води у верхньому б'єфі;

$Z_0$  – відмітка осі тунелю в розрахунковому перерізі;

$\rho_w$  – густина води;

$g$  – прискорення вільного падіння.

Тиск гідравлічного удару  $q_{wp}$  і тиск пульсації потоку води в тунелі  $q_p$  приймаються за даними розрахунків несталого режиму руху потоку води в підвідному тракті ГЕС (або ГАЕС). При визначенні величин  $q_{wp}$  і  $q_p$  враховуються дані заводу-виробника турбінного обладнання, що включають умови закриття (або відкриття) напрямного апарату турбіни, наявність зрівняльного резервуара та інші фактори.

Сейсмічний тиск води в тунелі визначається на основі спеціальних досліджень згідно з діючими нормами проектування [14]. При виконанні попередніх розрахунків значення сейсмічного тиску води в тунелі  $q_s$  може бути знайдено за формулою

$$q_s = \frac{a_s}{\pi} \rho_w \cdot C_0 \cdot T_0, \quad (4)$$

де  $a_s$  – розрахункове значення сейсмічного прискорення, яке приймається залежно від інтенсивності розрахункового землетрусу на ділянці розташування тунелю з урахуванням глибини закладення тунелю;

$C_0$  – швидкість звуку у воді, яка приймається  $C_0 = 1300$  м/с;

$T_0$  – переважаючий період сейсмічних коливань ґрунту, що дорівнює  $T_0 = 0.5$  с.

У загальному випадку всі параметри, що входять до рівняння зв'язку (1), є випадковими величинами. Однак деякі параметри через їхню малу мінливість можуть розглядатися як детерміністичні величини.

На основі аналізу мінливості параметрів, що входять до рівняння зв'язку (1), встановлено, що параметри  $r_i$ ,  $r_s$ ,  $A_s$ ,  $E_s$  доцільно розглядати як детерміністичні (невипадкові) величини, а параметри  $q$ ,  $r_e$ ,  $K_0$ ,  $R_{bt}$ ,  $R_s$  – як випадкові величини.

Випадкову величину внутрішнього тиску води в тунелі  $q$  відповідно до виразу (2) слід розглядати як суму випадкових величин статичного тиску води  $q_{st}$ , тиску гідравлічного удару  $q_{wp}$ , тиску пульсації потоку води  $q_p$ , сейсмічного тиску води  $q_s$ . Слід мати на увазі, що згідно з виразом (3) випадкова величина  $q_{st}$  є функцією випадкової величини відмітки рівня води у верхньому б'єфі  $Z_w$ , а відповідно до виразу (4) випадкова величина  $q_s$  є функцією випадкової величини сейсмічного прискорення  $a_s$ . Параметри  $Z_0$ ,  $\rho_w$ ,  $g$ ,  $C_0$ ,  $T_0$ , які входять до виразів (3), (4), доцільно розглядати як детерміністичні величини.

Випадкова величина зовнішнього радіуса облицювання  $r_e$  є сумою детерміністичної величини проектного зовнішнього радіуса облицювання  $r_{e,p}$  і випадкової величини перебору при проходці тунелю  $\Delta r_e$ , тобто  $r_e = r_{e,p} + \Delta r_e$ .

При виборі виду законів (функцій) розподілу випадкових величин, що входять до рівняння зв'язку (1), доцільно скористатися підходами, викладеними в роботах [6–8, 11 та ін.]. Прийнято такі види законів розподілу розглянутих випадкових величин:

- для випадкових величин  $K_0$ ,  $R_{bt}$ ,  $R_s$ ,  $\Delta r_e$  – нормальний закон розподілу;
- для випадкових величин  $q_{wp}$  і  $q_p$  – біноміальний закон розподілу;
- для випадкової величини  $a_s$  – закон розподілу Вейбулла;
- для випадкової величини  $Z_w$  – закон розподілу, якому відповідає комбінована функція розподілу згідно з рекомендаціями робіт [7 та ін.].

При визначенні параметрів функцій розподілу розглянутих випадкових величин

використовуються підходи, викладені в роботах [7, 11 та ін.].

Необхідно звернути увагу на таку обставину. Функції розподілу випадкових величин  $K_0$ ,  $R_{bt}$ ,  $R_s$ ,  $\Delta r_e$  є залежностями ймовірностей від аргументів цих функцій. У той же час функції розподілу випадкових величин  $Z_w$ ,  $q_p$ ,  $q_{wp}$ ,  $a_s$  є залежностями щорічних імовірностей від аргументів цих функцій. Таким чином, одиниці вимірювання ймовірностей випадкових величин, що розглядаються, різні. Для подолання цієї розбіжності при виконанні ймовірнісних розрахунків міцності залізобетонного облицювання напірного тунелю доцільно скористатися таким прийомом.

Функції розподілу випадкових величин  $Z_w$ ,  $q_p$ ,  $q_{wp}$ ,  $a_s$  зводяться до розрахункового терміну служби тунелю  $T$ . Ординати зведених функцій розподілу можуть бути отримані піднесенням до степеня  $T$  щорічних імовірностей, які є ординатами вихідних функцій розподілу. Значення  $T$  приймається за нормами проектування гідротехнічних споруд [3] залежно від класу відповідальності споруди (для споруд класів відповідальності СС3 і СС2-1 – 100 років, а для споруд класів відповідальності СС2-2 і СС1 – 50 років).

Далі, використовуючи зведені функції розподілу, виконуються розрахунки за визначенням імовірності руйнування облицювання тунелю  $P_T$  протягом розрахункового терміну служби споруди  $T$ . Після визначення значення  $P_T$  обчислюється значення щорічної ймовірності руйнування облицювання тунелю  $P$  за формулою [7 та ін.]

$$P = 1 - (1 - P_T)^{1/T}. \quad (5)$$

Для визначення ймовірності руйнування облицювання тунелю протягом розрахункового терміну служби споруди  $P_T$  в даній роботі використовується метод статистичних випробувань (Монте-Карло),

який дозволяє ефективно розв'язати поставлену задачу статистичної динаміки.

Відзначимо, що для забезпечення достовірності одержуваного, порівняно малого, значення  $P_T$  необхідна досить велика кількість статистичних випробувань  $N$ , яка може бути прийнята за рекомендаціями [7].

*Послідовність розрахунків з визначення ймовірності руйнування залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів методом Монте-Карло.* Доцільно прийняти таку послідовність (алгоритм) розрахунків імовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного гідротехнічного тунелю методом статистичних випробувань (Монте-Карло).

1. Приймається кількість статистичних випробувань  $N$ .

2. Для кожного статистичного випробування  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) виконуються такі розрахунки.

2.1. Задаються рівномірно розподіленими в інтервалі від 0 до 1 випадковими ймовірностями  $P_{K_0,i}$ ,  $P_{R_{bt},i}$ ,  $P_{R_s,i}$ ,  $P_{\Delta r_e,i}$ ,  $P_{q_{wp},i}$ ,  $P_{q_p,i} = P_{q_{wp},i}$ ,  $P_{a_s,i}$ ,  $P_{Z_w,i}$ , які відповідають випадковим величинам  $K_0$ ,  $R_b$ ,  $R_s$ ,  $\Delta r_e$ ,  $q_{wp}$ ,  $q_p$ ,  $Z_w$ .

2.2. За значеннями  $P_{K_0,i}$ ,  $P_{R_{bt},i}$ ,  $P_{R_s,i}$ ,  $P_{\Delta r_e,i}$ ,  $P_{q_{wp},i}$ ,  $P_{q_p,i}$ ,  $P_{a_s,i}$ ,  $P_{Z_w,i}$ , з використанням функцій розподілу визначаються квантілі – значення випадкових величин  $K_{0,i}$ ,  $R_{b,i}$ ,  $R_{s,i}$ ,  $\Delta r_{e,i}$ ,  $q_{wp,i}$ ,  $q_{p,i}$ ,  $a_{s,i}$ ,  $Z_{w,i}$ .

2.3. Обчислюються значення випадкових величин:

– статичного тиску води  $q_{st,i}$  за формулою (3);

– сейсмічного тиску води  $q_{s,i}$  за формулою (4);

– повного внутрішнього тиску води  $q_i$  за формулою (2);

– зовнішнього радіуса облицювання  $r_{e,i}$  за формулою  $r_{e,i} = r_{ep} + \Delta r_{e,i}$ ;

– напружень у робочій кільцевій арматурі  $\sigma_{s,i}$  за формулою (1).

2.4. Перевіряється виконання умови  $\sigma_{s,i} \leq R_{s,i}$ .

3. Після виконання всіх  $N$  статистичних випробувань обчислюється значення ймовірності втрати міцності залізобетонного облицювання тунелю протягом розрахункового терміну служби  $P_T$  як відношення кількості випробувань  $n_1$ , при яких  $\sigma_{s,i} \geq R_{s,i}$ , до кількості всіх випробувань  $N$ , тобто  $P_T = n_1/N$ .

4. Визначається щорічна ймовірність руйнування залізобетонного облицювання напірного тунелю  $P$  за формулою (5).

Викладений алгоритм розрахунків був реалізований у розробленій у ПрАТ «Укргідропроєкт» комп'ютерній програмі «Розрахунок ймовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного

гідротехнічного тунелю в експлуатаційний період».

*Приклад розрахунку.* З використанням розробленої комп'ютерної програми виконано розрахунок ймовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного підвідного тунелю № 5 Дністровської ГАЕС в перерізі на ПК 2+0.805, який показано на рисунку. Клас відповідальності тунелю – СС3. Статичний напір на осі тунелю в цьому перерізі складає 164.9 м. Сумарний тиск гідравлічного удару і пульсації потоку води в тунелі в період нормальної експлуатації становить 0.178 МПа, а при повному скиданні навантаження ГАЕС – 0.344 МПа.

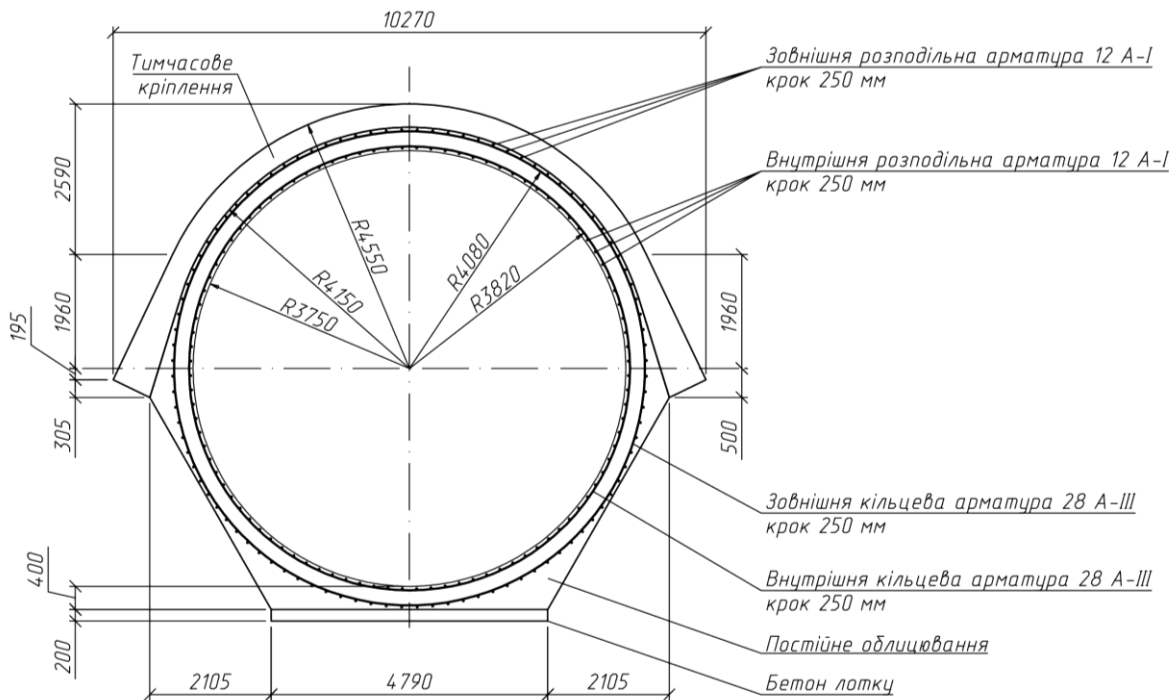


Рис. Поперечний переріз напірного підвідного тунелю № 5 Дністровської ГАЕС на ПК 2+0.805

При виконанні розрахунку була прийнята кількість статистичних випробувань  $N = 2000000$ . Отримано такі результати.

- ймовірність руйнування облицювання тунелю протягом розрахункового терміну служби  $P_T = 2.42 \cdot 10^{-4}$ .
- довірчий інтервал ймовірності руйнування облицювання тунелю протягом

розрахункового терміну служби при довірчій імовірності  $a = 0.95$  ( $2.64 \cdot 10^{-4} - 2.21 \cdot 10^{-4}$ );

– щорічна ймовірність руйнування облицювання тунелю  $P = 0.24 \cdot 10^{-5}$ .

За діючими нормами проектування гідротехнічних споруд [3], допустима ймовірність виникнення аварій для споруд класу відповідальності СС3 становить  $P_n = 5 \cdot 10^{-5}$ . Оскільки  $P = 0.24 \cdot 10^{-5} < P_n = 5 \cdot 10^{-5}$ , то можна вважати, що міцність залізобетонного облицювання підвідного тунелю № 5 Дністровської ГАЕС в перерізі на ПК 2+0.805 забезпечена.

**Висновки.** Обґрунтовано методику розв'язання задачі ймовірнісного

оцінювання міцності монолітних залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів ГЕС і ГАЕС в експлуатаційний період. Розроблено алгоритм розв'язання цієї ймовірнісної задачі методом Монте-Карло. Даний алгоритм реалізовано у комп'ютерній програмі «Розрахунок імовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного гідротехнічного тунелю в експлуатаційний період», яку складено в ПрАТ «Укргідропроєкт». Наведено приклад розрахунку ймовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного підвідного тунелю № 5 Дністровської ГАЕС.

### Список використаних джерел

1. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008. Система надійності та безпеки у будівництві. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 81 с.
2. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с.
3. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробітки. Гідротехнічні споруди. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 37 с.
4. EN 1990:2001. Eurocode: Basis of structure design. Brussels: CEN, 2002. 89 p.
5. СНиП 2.06.09-84. Тоннели гидротехнические / Госстрой СССР. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. 19 с.
6. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Е. Н. Беллендир, Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин, О. М. Финагенов, С. Г. Шульман. Санкт-Петербург: Изд-во «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2003. Т. 1. 554 с.; 2004. Т. 2. 524 с.
7. Вайнберг А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы. Харьков: Изд-во «Тяжпромавтоматика», 2008. 304 с.
8. Векслер Ф. Б., Ивашинцов Д. А., Стефанишин Д. В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. Санкт-Петербург: Изд-во «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2002. 592 с.
9. Matos J. C., Moreira V. N., Valente I. B., Cruz P.J.S., Neves L. C., Galvão N. Probabilistic-based assessment of existing steel-concrete composite bridges – Application to Sousa River Bridge. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 181. P. 95-110.
10. Вайнберг А. И. Оценка вероятности обрушения стены тоннельной выработки методом статистической параболлизации. *Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування*: Зб. наук. праць. Ч. 5. Рівне, 2002. Вип. 5(18). С. 24–32.

11. Вайнберг А. И. Алгоритм определения вероятности потери прочности сталежелезобетонной обделки высоконапорного тоннеля. *Гидроэнергетика Украины*. 2013. № 1. С. 24–32.

12. СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений / Минэнерго СССР. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. 32 с.

13. Вайнберг А. И. Расчет прочности железобетонной обделки напорного тоннеля с учетом работы бетона. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2013. Вип. 2 (62). С. 37–46.

14. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України / Мінрегіон України. Київ: ГП «Укрархбудинформ», 2014. 110 с.

---

Вайнберг Олександр Ісаакович, д-р техн. наук, професор, заступник генерального директора ПрАТ «Укргідропроєкт». Тел.: +380577021513. E-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua.

Vaynberg Oleksandr, Dr. Sc. (Tech), Professor, Deputy General Director of Ukrhidroproject PJSC. Tel.: +380577021513. E-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua.

Статтю прийнято 23.09.2019 р.

УДК 691.32/34

## РОЛЬ АКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУКТУРИ В ЖИТТЄВОМУ ЦИКЛІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Доктори техн. наук В. М. Вировой, О. О. Коробко, канд. техн. наук Ю. О. Закорчемний, асп. Н. Ф. Уразманова

## ROLE OF ACTIVE STRUCTURAL ELEMENTS IN LIFE CYCLE OF BUILDING CONSTRUCTIONS

D. Sc. (Tech.) V. Vyrovoy, D. Sc. (Tech.) O. Korobko, PhD (Tech.) Yu. Zakorchemny, postgraduate student N. Urazmanova

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186355>

---

*Поведінка будівельних виробів і конструкцій протягом усього життєвого циклу та безпека їх функціонування визначаються структурними змінами, що залежать від динаміки взаємодії та саморозвитку активних елементів, до яких відносять тріщини, внутрішні поверхні розділу та залишкові деформації. Активні елементи здатні забезпечувати стабілізацію властивостей через структуроутворюючий вплив на матеріал і запобігати процесам руйнування.*

**Ключові слова:** *конструкція-система, структуроутворюючі тріщини, тріщини руйнування, життєвий цикл, структурні зміни, активні елементи.*

*During the life cycle of building constructions, a complex of interconnected and interdependent processes and stages of structural changes are implemented that ensure the safety of their functioning. The structural elements that determines through their existence in the structure of any composite, the conditions of the life history of the construction-system are cracks, inner*

*surfaces of partition and residual deformations. The selected elements belong to the conditionally "invisible" parts of the material structure. Cracks, internal interfaces and residual deformations can be distinguished as active structural elements, as they are able to react to any influences in the same tempo-rhythm, predeterminations the timely manifestation of structural adaptation (self-organization). This ensures external and internal safety of constructions during operation. However, cracks, inner surfaces of partition and deformities can shorten the life history of the construction, taking it to the path of degradation and death. Thus, cracks, inner surfaces of partition and deformations perform both a structural and destructive role in the life cycle of a construction. Therefore, an important task should be considered an analysis of the role of active elements in the life cycle of building constructions. The carried out analysis contributes to solving the problems related to improvement of safety of structures and products functioning due to directed "guidance" of active elements in the form of cracks and internal interfaces with mandatory consideration of the influence of residual deformations. To quantify the change of total length of cracks and inner surfaces of partition can be through the coefficients of damage  $K_d$  and  $K_{d1}$ . Increasing structural diversity of concrete and expanded clay concrete contributes to the organization of structures in which the distribution of initial cracks prevents them from growing to dimensions dangerous to the structure.*

**Keywords:** *construction-system, structure-forming cracks, cracks-destroyers, life cycle, structural changes, active elements.*

**Вступ.** До життєвого циклу будівельних конструкцій відносять період часу існування конструкції як певної системної цілісності з моменту виготовлення та виконання нею проектних функцій до виведення з режиму експлуатації [1]. Це означає, що протягом усього зазначеного періоду реалізується сукупність взаємопов'язаних і взаємообумовлених процесів і стадій структурних змін, які забезпечують безпеку функціонування конструкцій. Історія «життя» конструкції формується під впливом особистих історій окремих елементів структури. До елементів структури, які самим існуванням у структурі будь-якого композита визначають умови життєвої історії конструкції-системи, справедливо віднесені тріщини і внутрішні поверхні розділу (ВПР), а також локальні та інтегральні залишкові деформації. До ВПР належать несущільності матеріалу, які утворюються при розвитку тріщин у момент виходу на поверхню берегів інших тріщин або поверхонь розділу. ВПР виникають на всіх рівнях неоднорідностей структури композитів [2]. Виділені елементи, здатні реагувати на зовнішні та внутрішні впливи

в одному з ними темпоритмі, зумовлюють своєчасне протікання процесів і явищ самоорганізації структури. Цим забезпечується зовнішня та внутрішня безпека роботи конструкцій у період експлуатації. Під безпекою функціонування слід розуміти здатність матеріалу при взаємодії зі своїм оточенням не викликати зміни основних параметрів, що характеризують стан цього оточення, а також здатність виробу зберігати свою цілісність та основні властивості в умовах дії зовнішніх і внутрішніх факторів. Проте тріщини, внутрішні поверхні розділу та деформації можуть скоротити історію «життя» конструкції-системи, виводячи її на шлях деградації та гибелі. Таким чином, тріщини, ВПР і деформаційні явища виконують як структуроутворюючу, так і руйнівну роль у життєвому циклі конструкції, що дозволяє розглядати їх як активні елементи структури. У зв'язку з цим постає питання з визначення функцій кожного виду активних елементів і аналізу їх взаємовпливу на відповідні зміни структури та умови руйнування конструкції.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** На сьогодні у сучасному матеріалознавстві існують загальноприйняті методи кількісного оцінювання в'язкості руйнування матеріалу за допомогою визначення коефіцієнтів концентрації напружень. Розроблено заходи з підвищення тріщиностійкості композиційних матеріалів і використання критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень при оцінюванні довговічності матеріалів і розрахунках конструкцій. Наведені дані свідчать про те, що тріщина є основним фактором, який визначає руйнування матеріалів і конструкцій з них.

Появу тріщин слід розглядати як об'єктивний процес, що реалізується на різних масштабних рівнях поліструктурних матеріалів. Причинами виникнення та розвитку тріщин спеціалісти вважають власні об'ємні деформації матеріалу в цілому та його окремих складових, градієнти температурних і вологісних деформацій, стискальні деформаційні ефекти, корозійні та осмотичні явища [3–7]. Разом з тим тріщини, внутрішні поверхні розділу і поля залишкових деформацій, які присутні в матеріалі до експлуатації, мають статус умовно невидимих елементів, хоча їх об'єктивне існування підтверджується практично всіма експериментальними дослідженнями. Але при поясненні та інтерпретації отриманих результатів присутність активних елементів у структурі композитів, як правило, ігнорується. Стійкість будь-яких складноорганізованих систем, до яких належать будівельні конструкції та вироби, у першу чергу визначається елементами структури з непередбачуваною поведінкою при взаємодії зі своїм оточенням. Механізми зародження та росту тріщин у гетерогенних грубодисперсних матеріалах майже не вивчаються. Хоча саме гетерогенність матеріалів типу бетонів і цементного каменю створює умови для виникнення поверхонь розділу з подальшою їх трансформацією в тріщини на різних рівнях

структури. Відомо, що стійкість матеріалу в умовах поперемінних впливів визначається поступовим накопиченням пошкоджень в об'ємі структурних неоднорідностей. Тому слід виявити фактори, що сприяють локалізації росту тріщин в окремих підструктурах, запобігаючи їх злиттю в магістральну тріщину.

**Визначення мети та завдань досліджень.** Руйнування зразків, виробів і конструкцій пов'язано з незворотним ростом тріщини, яка ділить об'єкт на окремі частини. Спеціалісти відмічають певні етапи «життя» тріщини – від моменту її зародження та підростання до перетворення в магістральну з виходом фронту тріщини на поверхню виробу чи конструкції. Для аналізу слід розглянути повний цикл існування конструкції, включаючи активну фазу її функціонування як відкритої складної динамічної системи. Виходячи з цього була поставлена мета роботи – підвищити безпеку функціонування будівельних виробів за рахунок певного підбору кількісного та якісного складів активних елементів структури бетону, до яких віднесені тріщини і ВІР, шляхом направленої зміни умов взаємодії твердіючого матричного матеріалу та заповнювачів. Для досягнення мети роботи були визначені такі завдання: проаналізувати роль активних елементів, особливо тріщин, у життєвому циклі будівельних конструкцій; вивчити умови переходу тріщин, що виконують структуроутворюючі функції, у тріщини, які спричиняють руйнування матеріалів і конструкцій.

**Матеріали та методи досліджень.** Експериментальні дослідження проводили на стандартних зразках-кубах, виготовлених з бетонних сумішей на гранітному щебені та керамзитовому гравії, що мали різний стан поверхні. Разом з традиційними складами важкого та легкого бетонів використовували склади, які містили природні заповнювачі та заповнювачі, що були апретовані гідрофобізатором ГКР-11.



Це дозволило забезпечити такі співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між цементною складовою та поверхнею заповнювачів:  $R_A > R_K$ ;  $R_A < R_K$ ;  $R_A = R_K$ , де  $R_A$  – величина адгезії матричного матеріалу до поверхні заповнювача,  $R_K$  – величина когезійної міцності цементної матриці. При постійній рухливості бетонної суміші були одержані бетон і керамзитобетон різних класів, що відрізнялися за показниками фізико-технічних властивостей, зокрема параметрами початкової пошкодженості.

Пошкодженість зразків, виробів, конструкцій поверхневими тріщинами і внутрішніми поверхнями розділу опосередковано відображує характер об'ємного тріщиноутворення [2]. «Рисунок» тріщин на поверхні об'єкта повторює «рисунок» тріщин всередині об'єкта, що дає змогу оцінити протяжність берегів тріщин в об'ємі матеріалу. Пошкодженість цементної складової оцінювали через коефіцієнт пошкодженості  $K_p$  як співвідношення  $K_p = \sum L_i / S$ , см/см<sup>2</sup>, де  $\sum L_i$  – сумарна протяжність технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу на виділеній поверхні зразка, см;  $S$  – фіксована площа поверхні зразка, см<sup>2</sup>; як співвідношення  $K_{p1} = \sum L_i / L_i$ , де  $\sum L_i$  – сумарна протяжність берегів окремих тріщин і внутрішніх поверхонь розділу (фактична довжина тріщини руйнування), см, вздовж геодезичної лінії  $L_i$ , см (найкоротша відстань між точками виходу фактичної тріщини руйнування на торцеві поверхні зразка).

**Основна частина досліджень.** Зміни рівня властивостей будівельних матеріалів і конструкцій пов'язані, як правило, з впливом умовно «невидимих» елементів структури, якими є технологічні (початкові, спадкові) тріщини та внутрішні поверхні розділу, а також технологічні (залишкові, початкові, спадкові) деформації. Вид активних елементів визначає їхню роль у поведінці матеріалів і виробів і характер реакцій на впливи.

Технологічні тріщини, які після прикладення навантажень переходять у ранг експлуатаційних тріщин, реалізують перманентні структурні зміни та визначають темпи їх прояву. Повсюдність тріщин у матеріалі порушує його суцільність, що ускладнює, а в багатьох випадках робить неможливим оцінювання властивостей за середніми значеннями. Тріщини, які є невід'ємним елементом процесу самоорганізації структури (тріщини-структурутворювачі), шляхом зміни власних параметрів сприяють самозбереженню цілісності конструкцій, що реалізується як прояв адаптаційної самоорганізації. Спонтанно розвиваючись у локальних зонах матеріалу, тріщини стають домінуючими елементами, які, розвиваючись, ведуть до руйнування виробу, переходячи з рангу «невидимих» у реально існуючі елементи. Наявність тріщин визначає внутрішні процеси тепло-масоперенесення, локальні та загальні деформації матеріалу, внутрішню та зовнішню безпеку конструкцій і т. п.

Внутрішні поверхні розділу разом з тріщинами є «невидимими» при прийнятих методах визначення властивостей матеріалів і виробів. Активність ВПР проявляється при перерозподілі зусиль і деформацій у матеріалі, релаксації деформацій, розсіюванні частини надлишкової енергії, направлених процесах масоперенесення та передачі теплової енергії за рахунок прояву поверхневих ефектів. Внутрішні поверхні розділу є своєрідним бар'єром на шляху руху тріщин. Перманентна взаємна трансформація тріщин у ВПР та ВПР у тріщини дозволяє припустити перманентну взаємодію різних за видом активних елементів, наслідки реалізації якої значною мірою визначають період активного функціонування конструкцій.

Для прогнозування стійкості будівельних композитів особливе значення мають залишкові деформації, які за аналогією з іншими активними елементами

є «невидимими» при існуючих методах оцінювання властивостей будівельних матеріалів і виробів. Сам факт існування технологічних деформацій повністю змінює якісну картину розрахункових схем будівельних виробів, що веде до зміни кількісних значень розподілу деформацій у виробках під напруженням. Спадкові деформації, розподіл яких залежить від геометричних параметрів конструкцій, визначають траєкторію розвитку тріщин, що впливає на умови фрагменталізації матеріалу конструкцій. Залишкові деформації ведуть до флуктуації густини матеріалу, що неминуче викликає зміну фізичних, міцнісних і деформаційних характеристик матеріалу одного й того самого складу в конструкціях. Слід відзначити особливу роль технологічних деформацій при формуванні теплових потоків у матеріалі конструкцій і виробів. Деформації визначають характер передачі теплової енергії та провокують тим самим розвиток локалізованих термічних деформацій. Останні ініціюють прояв місцевих деформацій зсуву та формування «струмочкового» механізму передачі тепла, створюючи умови збільшення ступеня структурного різноманіття конструкцій і виробів. Це ускладнює використання прийнятих коефіцієнтів теплопровідності при призначенні раціональних складів теплозахисних матеріалів. Крім того, поля початкових деформацій здатні змінюватися в результаті розвитку тріщин, що у свою чергу може підвищувати або знижувати безпеку функціонування виробів. Це пов'язано з тим, що залишкові деформації (стиску, розтягу, зсуву) залежно від характеру розподілу та виду здатні посилювати або знижувати здатність матеріалу конструкцій пристосовуватися до впливів різного виду.

Багатогранність і поліфункціональність активних елементів, особливо тріщин-структуроутворювачів, зумовлює їхній визначальний вплив на поведінку будівельних композитів в експлуатаційних

умовах. Це дає підставу стверджувати, що визначення базових елементів структури дозволяє призначити раціональні рецептурно-технологічні способи отримання конструкцій і виробів з бажаним набором активних елементів.

Тріщини при завершенні своєї структуроутворюючої ролі переходять у ранг тріщин руйнування. Тріщини руйнування (магістральні тріщини) можна розглядати як відкриті системи, що самоорганізуються. Мета існування такої системи полягає в проходженні повного життєвого циклу – від моменту перетворення тріщини-структуроутворювача в тріщину-систему через період функціонування тріщини-системи до завершення життєвого циклу при виході фронту тріщини на поверхню виробу. При утворенні тріщини-системи історія функціонування конструкції зводиться до історії росту магістральної тріщини. Поява тріщини-системи веде до зниження структурного різноманіття конструкції, внаслідок того, що процеси, які протікають в інших її підсистемах, стають неістотними. Для тріщини-системи навколишнім середовищем є базова конструкція-система. Тому тріщина руйнування замикає на себе всі зовнішні та внутрішні впливи, які діють на конструкцію, тим самим переорієнтуючи цільові функції базової системи на себе. Така система існує у власному темпоритмі, через самоорганізацію розвивається та завершує свій життєвий цикл, що веде до гибелі конструкції-системи.

Проведений аналіз дозволяє заключити, що поведінка будівельних конструкцій і виробів в умовах експлуатації значною мірою визначається безперервними структурними змінами, які залежать від динаміки взаємодії та саморозвитку активних елементів, до яких відносять технологічні та експлуатаційні тріщини, внутрішні поверхні розділу та залишкові деформації. Безпечно функціонування конструкції-системи багато в чому залежить від запобігання

переходу тріщин-структуроутворювачів у тріщину-систему. Вивчення умов такого переходу є важливим практичним завданням, що зумовлює необхідність розгляду повного циклу існування конструкції, особливо фазу її активного

функціонування як відкритої складної динамічної системи.

Конструкція як система проходить певні основні етапи свого «життя», на кожному з яких реалізуються специфічні процеси виникнення та росту тріщин (рисунок).

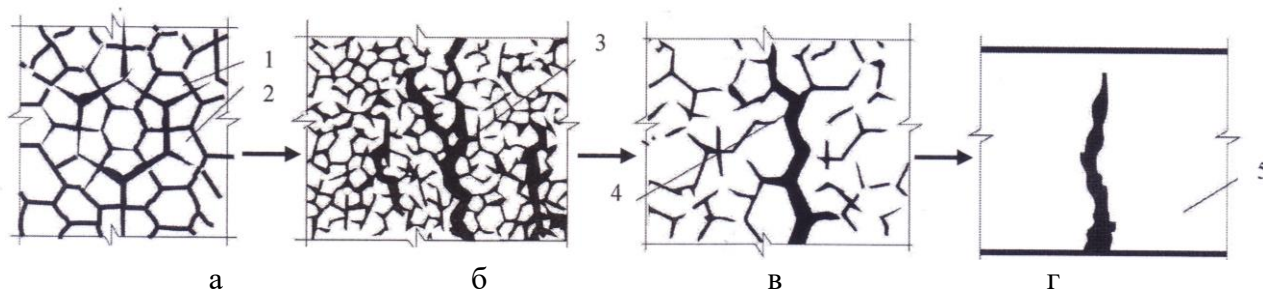


Рис. Схема зниження безпеки функціонування конструкції-системи:

а – гранично допустимий розвиток структури; б – критичне накопичення тріщин і ВПР в об'ємі матеріалу конструкції; в – зародження тріщини-системи в результаті злиття активних елементів; г – тріщина-система, що має власний розвиток; 1 – активні елементи структури (тріщини і внутрішні поверхні розділу); 2 – структурні блоки; 3 – тріщини руйнування, що утворилися шляхом об'ємного накопичення активних елементів; 4 – тріщини руйнування, що утворилися за рахунок злиття експлуатаційних тріщин і ВПР; 5 – фрагмент конструкції з тріщиною руйнування, що розвивається

Зародження та розвиток технологічних тріщин у структурі матеріалу відбувається на етапі виникнення і становлення системи. При цьому різні механізми організації структури кожного рівня неоднорідностей ведуть до одного результату – появи технологічних тріщин. Кількість і орієнтування початкових тріщин різних підсистем і всієї системи визначаються вихідним складом та інтенсивністю протікання фізико-хімічних і фізико-механічних явищ і процесів організації структури матеріалів. Початок функціонування системи слід вважати закінченням періоду її становлення. Конструкція вступає в робочий життєвий цикл з певним набором технологічних тріщин на всіх рівнях структурних неоднорідностей.

У період функціонування матеріал конструкції сприймає весь комплекс експлуатаційних навантажень, на який у

першу чергу реагують активні елементи. У цей період проявляються такі властивості тріщин-структуроутворювачів: релаксація деформацій і напружень у матеріалі, що примикає до берегів тріщин (тріщини-релаксатори); утворення нових площ поверхні берегів, що сприяє включенню до роботи метастабільних елементів (тріщини-тригери); трансформація тріщин у внутрішні поверхні розділу та навпаки, що веде до збільшення блочності матеріалу (тріщини-перетворювачі структури); розсіювання надлишкової енергії шляхом утворення нових поверхонь (тріщини-дисипатори).

Слід відзначити, що перераховані властивості мають не окремі тріщини, а кожна тріщина залежно від конкретної ситуації проявляє ту чи іншу властивість. У цьому проявляється структуроутворююча роль тріщини на кожному рівні структурних неоднорідностей і в усій

структурі. Відбувається постійна структурна перебудова, яка сприяє підвищенню різноманіття структури в границях конструкції. При цьому зміна структурного різноманіття з метою збереження потрібних параметрів властивостей має свою межу.

У системі, що функціонує, може виникнути ситуація, при якій тріщини-структуроутворювачі вироджуються в тріщини руйнування, які є провісником зниження параметрів властивостей і початку періоду гібелі конструкції як системи. У такій ситуації один з елементів структури бере на себе функцію системи, у якій він утворився, замикаючи мету створення та існування системи на себе. Такий елемент структури в першу чергу сприймає весь комплекс експлуатаційних навантажень, що сприяє його власному росту. При розмірі, порівняному з розмірами окремих підструктур, елемент-система вже не «відчуває» їхніх структурних особливостей. Це значно знижує структурне різноманіття системи. Процеси, які неминуче протікають в окремих підсистемах, структурних блоках і т. п., для домінуючого елемента структури неістотні. Такий елемент структури, у нашому випадку – тріщина руйнування, сам стає системою, яку можна розглядати як відкриту складну динамічну систему.

Відкритість передбачає, що тріщина своїми елементами здатна сприймати, передавати і перерозподіляти деформації та напруження в навколишньому середовищі – вихідній системі. Складність у даному випадку пов'язана не тільки зі складною структурою самої тріщини, але й з достатньо складною її поведінкою. Будучи сама нестабільною системою, тріщина руйнування, реагуючи на зовнішні впливи, здатна зупинятися, викривляти обриси фронту, вбирати в себе інші тріщини, реагувати на перерозподіл локальних та інтегральних полів залишкових деформацій. Динамічність тріщини як системи полягає в тому, що кожний

наступний її стан визначається попереднім. Новий стан при цьому може відрізнитися від попереднього за багатьма параметрами та показниками. Це передбачає незворотність розвитку динамічної тріщини-системи в процесі досягнення цільової установки. Цільова установка нової системи, що утворилася і для якої вихідна система стає підсистемою, полягає в забезпеченні повного життєвого циклу.

Тріщина як система проходить повний шлях свого «життя» – зародження, активне функціонування та гібелі. Гібелі тріщини як системи настає тоді, коли зникають головні її атрибути – устя і фронт. Відмінність тріщин руйнування від тріщин-структуроутворювачів полягає, на нашу думку, у тому, що гібелі перших пов'язана зі зникненням фронту при його виході на поверхню зразка, виробу, конструкції і т. п. Гібелі тріщин-структуроутворювачів реалізується при виході їхнього фронту на береги інших тріщин і поверхонь розділу. У даному випадку відбувається не стільки гібелі тріщин-структуроутворювачів, скільки їх спонтанна трансформація в якісно інший елемент структури – внутрішню поверхню розділу.

У період активного життя для забезпечення пріоритету власного розвитку тріщина руйнування як система використовує всі потенційні можливості базової системи та її структурні особливості. До характерних особливостей тріщини-системи, що виникла, можна віднести розмір (об'єм), який включає до себе декілька підсистем базової системи та перетворює її таким чином у самостійну вкрай нестабільну систему; здатність «втягувати» в себе на шляху власного росту інші активні елементи структури (множинність атракторів породжує виникнення одного атрактора); здатність направленої концентрації енергії в зоні свого розвитку, що практично виключає вплив структурного різноманіття базової системи на умови росту нової системи.

При досягненні певного етапу росту нова система здатна, використовуючи власні ресурси, необоротно розвиватися; починає існувати у своєму темпоритмі, прагнучи завершити свій розвиток. Це веде до гибелі одразу двох систем – нової системи за рахунок досягнення мети свого існування та базової системи за рахунок того, що нова система шляхом своєї гибелі призвела до втрати її основних функцій. На цьому завершується життя конструкції як вихідної системи в результаті завершення росту тріщини руйнування.

Кількісно оцінити зміну структури матеріалу під дією зовнішніх факторів можна через коефіцієнти пошкодженості  $K_p$  та  $K_{p1}$ .

Розвиток магістральної тріщини проходить по траєкторії експлуатаційних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу, що накопичуються в матеріалі під дією силових навантажень. Це передбачає, що геометричні параметри тріщини руйнування спадково визначаються кількістю і рельєфом берегів початкових тріщин і ВПР, орієнтованих по фронту її руху. Найменшими значеннями пошкодженості в умовах експерименту відзначалися зразки з бетону та керамзитобетону, що мають структуру, організовану при  $R_A = R_K$ .

Проведені дослідження показали, що показники пошкодженості важкого бетону збільшуються при формуванні структури в умовах  $R_A = R_K$  на 21 і 29 % порівняно зі структурами, організованими при  $R_A < R_K$  або  $R_A > R_K$  відповідно. Вибірковість адгезії матричного матеріалу до поверхні заповнювачів веде до утворення структури, що забезпечує зменшення значень пошкодженості керамзитобетону, які є меншими, ніж значення  $K_p$  керамзитобетонних зразків традиційних складів на 19–39 %.

Після 100 циклів поперемінної дії температурних і вологісних факторів пошкодженість бетонів збільшилась у середньому на 40 % (важкий бетон) і 30 % (керамзитобетон). При цьому показник

коефіцієнта пошкодженості  $K_{p1}$  був меншим при збільшенні показника коефіцієнта пошкодженості  $K_p$ . Порівняно з величиною пошкодженості бетонів традиційних складів бетони з вибірковою адгезією ( $R_A = R_K$ ) цементної матриці до поверхні заповнювачів мали структуру, при якій значення  $K_p$  є більшими на 11–15 %, значення  $K_{p1}$  меншими на 20–25 %. Це свідчить про те, що збільшення структурного різноманіття веде до формування структури, при якій початковий розподіл тріщин запобігає їх росту до розмірів, що є небезпечними для певного рівня неоднорідностей і всього матеріалу.

**Висновки.** Важливим фактором безпечного функціонування будівельних конструкцій як системи є прогнозування структуроутворюючої та руйнівної ролі активних елементів у розвитку структури на всіх етапах життєвого циклу. Активність тріщин, внутрішніх поверхонь розділу та залишкових деформацій полягає в їх здатності реагувати на внутрішні та зовнішні фактори, визначаючи структурну «перебудову» конструкції-системи, що можна кількісно оцінювати через коефіцієнти пошкодженості. Тріщини, які здатні, змінюючи свої параметри, визначати різноманітні зміни структури всієї конструкції та її окремих підсистем, віднесені до структуроутворюючих тріщин. Після досягнення граничних структурних змін у системі самозароджуються нові активні елементи – тріщини руйнування (магістральні тріщини), які здатні замикати мету існування конструкції-системи на себе. Тому тріщини руйнування можуть бути представлені як відкрита динамічна система, цільова установка якої полягає у власному розвитку. Поява тріщин руйнування спрощує структурне оформлення конструкції як базової системи та призводить до завершення її життєвого циклу. В умовах несприятливих зовнішніх впливів активні елементи сприяють збереженню цілісності та безпеці функціонування конструкції-системи. З

рангу «невидимих» елементів тріщини, внутрішні поверхні розділу та залишкові деформації мають перейти в ранг об'єктивно існуючих, що дозволить

розширити можливості проектування матеріалів, виробів і конструкцій загальнобудівельного та спеціального призначення.

### Список використаних джерел

1. Выровой В. Н., Дорофеев В. С., Суханов В. Г. Системный подход при анализе структуры строительных композиций. *Ресурсоэкономные материалы, конструкции, будівлі та споруди: зб. наук. пр.* 2008. Вип. 16. Ч. 1. С. 133-139.
2. Суханов В. Г., Выровой В. Н., Коробко О. А. Структура материала в структуре конструкции. Одеса: Полиграф, 2016. 244 с.
3. Грушко И. М., Ильин А. Г., Чихладзе Э. Д. Повышение прочности и выносливости бетона. Харків: Вища школа, 1986. 152 с.
4. Чернявский В. Л. Адаптация абиотических систем: бетон и железобетон. Днепропетровск: ДНУЖТ, 2008. 412 с.
5. Plugin A., Dedeneva E., Kostyuk T., Bondarenko D., Demina O. Formation of structure of high-strength composites with account of interactions between liquid phase and disperse particles. *Open Access Journal «МАТЕС Web of Conferences»*. 2017. V.116. 8 p. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711601010> (last access: 11.09.2019).
6. Зайцев Ю. В., Леонович С. Н. Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной. Минск: БНТУ, 2010. 362 с.
7. Солодкий С. Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2008. 144 с.

---

Вировой Валерій Миколайович, д-р техн. наук, професор кафедри виробництва будівельних виробів та конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (+038) 097-48-94-979. E-mail: vyrovoy@ukr.net.

Коробко Оксана Олександрівна, д-р. техн. наук, професор кафедри архітектурних конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (+038)096-36-90-522. E-mail: okskorobko71@gmail.com.

Закорчемний Юрій Орестович, канд. техн. наук, завідувач кафедри архітектурних конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (+038)098-55-24-607. E-mail: zakorchemny@gmail.com.

Уразманова Надія Фанісівна, аспірант кафедри архітектурних конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (+038) 0679339643. E-mail: nadegdaurazmanova@gmail.com.

Vyrovoy Valerii, Dr. Sc. (Tech.). Professor, Department of Production of Building Products and Constructions, Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture. Tel.: (+038) 097-48-94-979. E-mail: vyrovoy@ukr.net.

Korobko Oksana, Dr. Sc. (Tech.). Professor, Department of Architectural Constructions, Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture. Tel.: (+038) 096-36-90-522. E-mail: okskorobko71@gmail.com.

Zakorchemny Yurii, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Architectural Constructions, Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture. Тел.: (+038)098-55-24-607. E-mail: zakorchemny@gmail.com.

Urazmanova Nadiia, postgraduate, Department of Architectural Constructions, Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture. Тел.: (+038) 0679339643. E-mail: nadegdaurazmanova@gmail.com.

Статтю прийнято 25.09.2019 р.

УДК 666.9

**ВАПНЯНО-ГПСОВІ В'ЯЖУЧІ В ТЕХНОЛОГІЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$**

Д-р техн. наук С. М. Логвінков, канд. техн. наук О. М. Борисенко,  
канд. сільск.-госп. наук А. А. Івашура, канд. техн. наук Г. С. Попенко

**LIME-GYPSUM BINDERS IN THE TECHNOLOGY OF HEAT INSULATING MATERIALS SYSTEMS  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$**

D. Sc. (Tech.) S. Logvinkov, PhD (Tech.) O. Borysenko, PhD (Agr.) A. Ivashura,  
PhD (Tech.) G. Popenko

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186372>

---

*У статті розглядаються питання технології теплоізоляційних матеріалів на основі псевдоволластоніту та анортиту на прикладах ряду експериментальних складів ливарних мас з варіюванням кількості в'язучого, співвідношення вапно / гіпс, додавання глинозему. Аналізуються технологічні параметри: вологість ливарних мас, час закінчення тужавлення і температура випалу зразків, а також фізико-механічні властивості матеріалів: уявна щільність, межа міцності при стисненні і загальна усадка. Наводяться результати рентгенофазового аналізу проб матеріалів і особливості формування мікропористості за результатами петрографічного аналізу. Пропонуються варіанти видозмін технології для розширення функціональної придатності матеріалів і підвищення їхніх фізико-механічних властивостей.*

**Ключові слова:** вапно, гіпс, ливарні маси, волластоніт, анортит, пісок, глинозем, мікропористість.

*In Ukraine, at present, insulating materials whose phase composition is represented by pseudo-wollastonite ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) and anorthite ( $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ) are not industrially produced. At the same time, such materials are more effective in heat-insulating ability compared to chamotte lightweight with comparable characteristics of porosity and apparent density. Moreover, these materials do not wet and do not react with aluminum melts and its alloys with other non-ferrous metals, which in recent years has led to the large-scale import of such products for lining electrolytic cells, induction furnaces and the manufacture of injection equipment. An additional motivation in the development of such materials is the modern and progressively growing tendency to obtain, on the basis of synthetic wollastonite, anhydrous and specially granulated in the form of microspheres powder mixtures of a new generation – slag-forming and heat-insulating steels for casting steel and molds of continuous casting machines. The above circumstances stimulated the development of such materials for reasons of availability of raw materials in Ukraine, the possibility of using a simple method of forming products – casting self-hardening masses into calcareous forms on lime-gypsum binders, as well as relatively low firing temperatures. The report discusses the issues of technology of heat-insulating materials based on pseudo-wollastonite and anorthite using examples of a number of experimental compositions of injection molding materials with varying amounts of binder, lime / gypsum ratio, and the addition of alumina. The technological parameters are analyzed: the moisture content of the casting mass, the setting end time and the firing temperature of the samples, as well as the physical and mechanical properties achieved by the samples of the materials: apparent density, compressive strength and general shrinkage. The*

results of x-ray phase analysis of samples of materials and the features of the formation of microporosity according to the results of petrographic analysis of powder samples in immersion preparations are presented. Variants of technology modification are proposed to expand the functional applicability of research materials and increase their physical and mechanical properties.

**Keywords:** lime, gypsum, foundry masses, wollastonite, anorthite, sand, alumina, micro porosity.

**Вступ.** Проблема зниження енерговитрат на всіх етапах технології будівельних матеріалів, експлуатації виробів і конструкцій з них є актуальною не тільки для будівельної, але і для суміжних галузей промисловості. У наш час найбільш інтенсивна імплементація досягнень матеріалознавців у вирішенні цієї науково-технічної проблеми спостерігається в розробленні і застосуванні нових видів теплоізоляційних матеріалів. При цьому відносно дешеві теплоізоляційні матеріали з застосуванням органічних компонентів (саман, арболіт, пінополістирольні вироби та інші) все більше заміщуються в будівництві більш дорогими, але стійкими до біокорозії та пожегобезпечними неорганічними матеріалами (піно- і газобетон, керамзит, волокнисті мінеральні плити, наприклад базальтові, та інші). У технології таких матеріалів не тільки застосовуються спеціальні природні інгредієнти (крейда, глини, вапняк, пірофіліт ( $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$  або  $AS_4H$ , де тут і далі будуть застосовуватися скорочення: А –  $Al_2O_3$ , С – CaO, S –  $SiO_2$ , Н –  $H_2O$ ) та інші), але й штучні і техногенні (спеціальні види в'язучих речовин, пористі наповнювачі та заповнювачі різного функціонального складу (спучений перліт, аглопорит, відвальні та гранульовані шлаки, відходи феросплавних виробництв у вигляді кварцових мікросфер і т. п.)). Наявність такої великої сировинної бази, у т. ч. такої, що включає відходи різних виробництв, створює необхідні конкурентні умови цих технологій навіть за наявності в них стадій термообробки (автоклавування, роздув розплавів, спікання при випалюванні).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Чимало ефективних теплоізоляційних матеріалів відносять до системи  $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ , що пояснюється можливістю застосовувати в їхній технології недефіцитні в'язучі (гіпс, вапно, глини та каолін, портланд- і глиноземистий цемент, кремнезоль та інші) і наповнювачі (пісок, шамот, глинозем, шлаки, шамот, перліт та інші). Разом з тим такі матеріали задовольняють за технічними характеристиками вимоги не тільки до різних типів теплоізоляції будівель і споруд промислового та цивільного будівництва, а й до теплоізоляції теплових агрегатів, спеціального оснащення для розливання сплавів кольорових і благородних металів, вузлів і конструкцій нової техніки. Безумовно, за масштабами виробництва й уніфікованості функціонального застосування виділяються теплоізоляційні вироби на основі шамоту – шамотний легковаг, а також вироби та матеріали на основі мінеральних волокон. Однак спеціальні теплоізоляційні матеріали на основі піноскла, корундових і кварцових мікросфер, мулітового та корундового волокна необхідні в промислових масштабах для об'єктів нової техніки. Більш того, в останні два десятиліття різко зросла потреба в теплоізоляційних матеріалах на основі воластоніту (CS), анортиту ( $CAS_2$ ) і гексаалюмінату кальцію – боніту ( $CA_6$ ). Така тенденція обумовлена не тільки високою теплоізоляційною ефективністю, але і розширеним температурним інтервалом експлуатації (від 1250 до 1750 °C) в особливо агресивних газових середовищах, у тому числі з високим вмістом CO, у контакті з вуглецем і



багатьма кольоровими металами. Ці властивості мають вирішальне значення в застосуванні таких матеріалів для виготовлення оснастки лиття алюмінієвих та інших сплавів кольорових металів і конструкційного футерування агрегатів органічного синтезу й електролізерів, спеціальних захисних екранів для теплоенергетичних установок, а також для виготовлення на їх основі нового покоління шлакоутворюючих і теплоізолюючих сумішей (ШУС і ТІС) для застосування в ковшах конверторної виплавки сталі і в кристалізаторах машин безперервного лиття заготовок. З цих причин розроблення таких теплоізоляційних матеріалів актуальне для різних галузей промисловості.

Фізико-хімічною основою отримання матеріалів системи  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  є відповідна діаграма стану, яка досить детально досліджена у зв'язку з важливістю її підсистем для технології портландцементу, глиноземистого цементу й алюмосилікатних вогнетривів [1–5]. Особливості фазоутворення матеріалів цієї системи залежно від сировинних компонентів, їх передісторії, дисперсності, наявності домішок і введення спеціальних добавок вивчаються досі [6–9]. На думку авторів робіт [10–13], найбільш точно управляти процесом формування

мікроструктурною пористістю при отриманні таких теплоізоляційних матеріалів дозволяє застосування вапняно-гіпсових в'язучих, карбонату кальцію, модифікуючих добавок, а також ступінь дисперсності кожного сировинного компонента й особливості термообробки.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Викладені обставини визначили мету роботи – дослідити фізико-механічні властивості зразків теплоізоляційних матеріалів воластонітового й аналогового фазового складу, одержуваних методом лиття в розбірні форми самотвердіючих мас з наповнювача (кварцовий пісок – крейда) і вапняно-гіпсового в'язучого без застосування піноутворювача та вигораючих добавок.

**Основна частина дослідження.** Як основні сировинні матеріали застосовували недефіцитні на українському ринку і відносно дешеві матеріали: гіпс Артемівський марки Г-10; крейду марки ММС-2; кварцовий пісок Новоселівський мелений марки А з питомою поверхнею  $4500 \text{ см}^2/\text{г}$ ; вапно гашене 1 сорту виробництва ПП «Арка-сервіс»; глинозем марки Г00.

Оксидний склад сировинних матеріалів визначено за результатами хімічного аналізу та наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сировинних матеріалів (мас. %)

Найменування	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_2$	Нерозчинний залишок	Втрати при прожарюванні
Гіпс	0,61	0,77	0,11	37,58	1,51	50,4	–	9,02
Крейда	1,20	–	0,19	54,02	не визн.	не визн.	2,20	42,39
Пісок	99,59	–	0,13	не визн.	не визн.	не визн.	–	0,28
Вапно	1,23	0,51	0,41	65,32	0,40	не визн.	1,79	30,34
Глинозем	0,02	99,44	0,02	не визн.	не визн.	не визн.	–	0,52

Всі сировинні матеріали висушені в сушильній шафі до постійної ваги при  $110^\circ\text{C}$ . Кварцовий пісок застосовувався товарного ступеня дисперсності, глинозем

мололи у вібромліні з модифікуючою добавкою до повного проходження через сито № 0063. Вапно, гіпс і крейду мололи в кульовому млині (співвідношення

куля : матеріал становило 4:1) до повного проходження через сито № 0315. Змішування матеріалів проводили в двовальному лопатевому Z-подібному змішувачі протягом 20 хв, після чого додавали розрахункову кількість водопровідної води і перемішували масу ще 5 хв. Готову масу розливали в змащені солідолом розбірні металеві форми (50×50×50 мм), надлишок маси знімали металевим шпателем. З кожного складу мас готували по 8 зразків. Залиті форми поміщали в целофанові мішки для запобігання випаровування води з відкритої поверхні зразків, і «термосне» твердіння при 60 °С проводили протягом 1 доби. Після розпалубки зразки виставляли на шамотні підставки й обпалювали в тунельній газовій печі при різних температурах випалу – 1220, 1260 і 1280 °С.

Рентгенофазовий аналіз проводили на дифрактометрі ДРОН-3М. Ідентифікація фаз здійснювалася у відповідності з даними картотеки американського товариства ASTM. Петрографічні дослідження проводили методом вивчення порошкових проб матеріалу в імерсійних препаратах (стандартний набір імерсійних рідин ІЖ-1) під поляризаційним мікроскопом МІН-8.

Фізико-механічні властивості обпалених зразків визначали стандартними для кераміки методами, які гармонізовані з Європейськими EN і ISO за вимірюванням уявної щільності ( $j$ ), усадки ( $\Delta l$ ) і межі міцності при стисненні ( $\sigma_{ст}$ ). Склади шихти, вологість литтєвої маси ( $W$ ), час закінчення тужавлення ( $\tau$ ), середні значення фізико-механічних властивостей і максимальна температура випалу ( $T$ ) подані в табл. 2.

Таблиця 2

Склади та властивості зразків

Номер складу	Крейда	Гіпс	Пісок	Вапно	Глинозем	W, %	$j$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\Delta l$ , %	$\tau$ , хв.	T, °С
1	44,00	22,00	34,00	–	–	50	1,12	3,0	13,6	*	1220
2	44,00	22,00	34,00	–	–	45	1,05	2,5	5,5	10	1220
3	44,00	22,00	34,00	–	–	40	1,00	1,7	5,1	5	1220
4	44,00	22,00	34,00	–	–	38	1,04	1,6	6,2	10	1220
5	43,60	15,26	34,60	6,54	–	45	1,08	1,9	9,3	*	1220
6	43,60	15,26	34,60	6,54	–	40	1,01	1,7	3,6	10	1220
7	43,60	15,26	34,60	6,54	–	35	1,03	2,4	4,1	10	1220
8	47,00	19,00	34,00	–	–	50	1,02	1,2	5,6	25	1220
9	47,00	19,00	34,00	–	–	50	0,90	1,8	1,3	20	1260
10	47,00	19,00	34,00	–	–	50	0,87	2,3	2,9	20	1280
11	31,40	11,00	36,20	21,40	–	45	1,07	1,7	3,9	25	1220
12	31,40	11,00	36,20	21,40	–	45	0,98	2,9	3,1	20	1260
13	31,40	11,00	36,20	21,40	–	45	1,06	7,2	5,7	20	1280
14	31,40	11,00	36,20	21,40	–	50	1,07	5,7	2,1	10	1260
15	31,40	11,00	36,20	21,40	–	50	1,04	6,0	2,7	10	1280
16	15,00	20,00	20,00	–	45,00	50	1,16	6,6	3,0	10	1260
17	15,00	20,00	20,00	–	45,00	50	1,09	4,6	2,7	10	1280
18	15,00	20,00	20,00	–	45,00	70	0,94	1,2	7,3	20	1220
19	15,00	20,00	20,00	–	45,00	70	1,04	5,5	18,3	20	1260
20	15,00	20,00	20,00	–	45,00	70	0,92	2,2	11,7	20	1280
21	15,00	20,00	20,00	–	45,00	65	1,10	2,2	2,7	10	1260

Примітка. \*Зразки після розпалубки не затужавіли, деформуються при натисканні пальцями.

Склади шихти № 1–15 в перерахунку на оксиди близькі до стехіометрії воластоніту, а № 16–21 – до стехіометрії анортиту. В окремих групах складів застосовували тільки гіпсові в'яжучі (№ 1–4, 8–10, 16–21), а для всіх інших складів застосовували комбіноване вапняно-гіпсове в'яжуче. Наявність у складах шихт сульфату кальцію (гіпс), карбонату кальцію (крейда) і гідрату кальцію (вапно) забезпечує протікання у випаді процесів десульфурації, декарбонізації і дегідратації з видаленням із зразків відповідних газоподібних продуктів, що визначає формування характерної пористості. Ці процеси протікають з різною інтенсивністю, не збігаються з інтервалом розвитку і відрізняються за значеннями теплових ефектів. Крім того, при випаді протікають не тільки деструктивні процеси, але і синтез новоутворень кристалічних фаз, зростання і орієнтація цих кристалів, утворення зростків, плавлення мікродомішок, поліморфні перетворення:  $\beta$ -CS  $\rightarrow$   $\alpha$ -CS (псевдоволастоніт) при 1125°C;  $\beta$ -кварц  $\rightarrow$  метакристобаліт; триклинний  $\rightarrow$  ромбічний  $\rightarrow$  гексагональний  $\text{CaS}_2$  та інші. Більшість із зазначених процесів зумовлюють різні за знаком і величиною об'ємні зміни, що може, зокрема, порушувати стеричний контакт зерен і перешкоджати синтезу стехіометричних сполук. Багатоваріантність і складність механізму цих гетерофазних процесів неоднозначно проявляються у властивостях зразків з різним складом і не дозволяють з єдиних теоретичних позицій прогнозувати взаємозв'язок «склад – структура – властивості» (табл. 2). Навіть у закономірностях зміни фізико-механічних властивостей зразків у межах однієї групи складу є аномальні відхилення. Трагування причин прояву відхилень ускладнюється зазначеною складністю структуроутворення матеріалу при випаді.

У складах, близьких за стехіометрією воластоніту, за результатами рентгенофазового аналізу ідентифікують обидві

поліморфні модифікації з тенденцією зростання інтенсивностей дифракційних максимумів  $\alpha$ -CS (високотемпературна модифікація, псевдоволастоніт) і зниженням інтенсивності  $\beta$ -CS (міжплощинні відстані ( $d$ ) = 0,769; 0,384; 0,350; 0,330; 0,296; 0,182 нм). Серед супутніх кристалічних фаз відзначено наявність непрореагованого ангідриту ( $\text{CaSO}_4$ ), кварцу ( $d$  = 0,423; 0,226; 0,213 нм) і кристобаліту ( $d$  = 0,402; 0,313; 0,249 нм). В анортитових складах домінуючою фазою є  $\text{CaS}_2$  ( $d$  = 0,370; 0,319; 0,269 нм), а всі перераховані вище сполуки присутні в підпорядкованій кількості (інтенсивність дифракційних максимумів ангідриту – на рівні фону). Результати петрографічного аналізу узгоджуються з даними рентгенівської дифракції. Всі матеріали зразків високопористі, містять значну кількість пор закритого типу на мікророзмірному рівні. Вміст псевдоволастоніту в складах № 1–15 від 83 до 85 об. % у зразках, обпалених при 1280 °C, вміст  $\beta$ -CS – від 3 до 4 об. %, склофази мало (до 2 об. %), зустрічаються зерна (до 20 мкм) непереродженого кварцу (2–4 об. %) в агрегатах (до 40 мкм) з метакристобалітом (5–7 об. %). У складах № 16–21 спостерігається значна кількість дрібних округлих зерен, які погано кристалізовані і віднесені до анортиту на тлі з воластонітом, які мають більш високий показник заломлення (1,631–1,636). Загальний вміст анортиту орієнтовно 80 об. %

**Висновки.** Всі досліджені зразки матеріалів отримано без застосування вигоряючих і спучуючих добавок при порівняно низькотемпературних режимах випаду 1220–1280 °C і стабільно забезпечують низьку уявну щільність (не більше 1,1 г/см<sup>3</sup>), що дозволяє прогнозувати для них середнє значення коефіцієнта теплопровідності при 600 °C на рівні 0,25 Вт/(м·К). Характеристики міцності ряду і воластонітового, і анортитового складів перевищують 5 МПа (№ 13–16, 19 за табл. 2) і дозволяють рекомендувати їх

як базовий варіант (з подальшим доопрацюванням технології) теплоізоляційних конструкційних виробів для температур експлуатації 1200 °С (№ 13–15) і 1400 °С (№ 16, 19). Склади з більш

низькими характеристиками міцності можуть бути реперними при отриманні спеціальних порошкових сумішей для шлакоутворення та теплоізоляції розплаву сталі і заготовок, що відливаються з неї.

### Список використаних джерел

1. Бережной А. С. Многокомпонентные системы окислов. Киев: Наукова думка, 1970. 544 с.
2. Логвинков С. М., Вернигора Н. К., Шаповал В. П., Бурак Н. П. Термодинамика фазовых равновесий системы  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  в решении проблем керамического материаловедения. *Термодинамика и материаловедение: труды 5 семинара СОРАН-УрОРАН*. Новосибирск: ИНХ им. А. В. Николаева СО РАН, 2006. С. 48–49.
3. Шабанова Г. Н., Цапко Н. С., Логвинков С. М. Субсолидусное строение системы  $\text{CaO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ . Часть 1. Термодинамический анализ фазовых равновесий в системе  $\text{CaO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ . *Огнеупоры и техническая керамика*. 2007. № 1. С. 4–10.
4. Marie-Noëlle de Noirfontaine, Sandrine Tusseau-Nenez, Caroline Girod-Labianca, V. Pontikis. CALPHAD formalism for Portland clinker: thermodynamic models and databases. *Journal of Materials Science, Springer Verlag*. 2012. 47 (3). P. 1471-1479.
5. Логвинков С. М. Твердофазные реакции обмена в технологии керамики: монография. Харьков: Издательство ХНЭУ, 2013. 248 с.
6. Фазоутворення в системі «глина – тоберморит» при випалі / З. І. Боровець та ін. *Збірник наукових праць ПАТ «УКРНДІВОГНЕТРИВІВ ім. А.С. Бережного»*. 2014. № 114. С. 106–115.
7. Воластонит / под ред. В. П. Петрова. Москва: Наука, 1982. 112 с.
8. Влияние суперпластифицирующих поликарбонатных добавок на физико-механические свойства высокоглиноземистого цемента / С. М. Логвинков и др. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2006. Вип. 43. С. 143–152.
9. Logvinkov S. M., Shabanova G. N., Shumejko V. N., Kryvtsova N. K. Complex modifying additives with application of the silicacontaining waste for Portland cement composition. *18 International Baustofftagung*, 12–15 September, 2012. Tagungsbericht. Band 1. Weimar, Bundesrepublik, Deutschland. Weimar, 2012. S. 923–928.
10. Пат. 93092 України. Спосіб виготовлення синтетичного воластоніту. МПК С04В 35/057, 35/16, 35/64, 35/66. № а 200900234; заявл. 13.01.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.
11. Пат. 101580 України. Шихта для синтезу воластоніту. МПК С04В 35/03. № а 201202449; заявл. 25.06.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7.
12. Пона М. Г., Боровець З. І., Кобрин О. В., Кочубей В. В. Використання гідротермальної обробки в технології воластоніту. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. Львів: НУ «ЛП», 2012. № 726. С. 303–308.
13. Shulyra O., Vakhula Y., Borovets Z., Pona M., Solokha I. Low-temperature roasted wollastonite in designing easily meltable glazes of an increased hardness. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 3, № 11 (75). P. 14–18.

Логвинков Сергій Михайлович, д-р техн. наук, професор кафедри природоохоронних технологій, екології та безпеки життєдіяльності Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця. Тел. (057) 702-07-16. E-mail: Sergii.Logvinkov@hneu.net.

Борисенко Оксана Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри природоохоронних технологій, екології та безпеки життєдіяльності Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця.  
E-mail: Oksana.Borysenko@hneu.net.

Івашура Андрій Анатолійович, канд. сільск.-госп. наук, доцент кафедри природоохоронних технологій, екології та безпеки життєдіяльності Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця.  
E-mail: Andrii.Ivashura@hneu.net.

Попенко Галина Степанівна, канд. техн. наук, доцент кафедри природоохоронних технологій, екології та безпеки життєдіяльності Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця.  
E-mail: Halyna.Popenko@hneu.net.

Logvinkov Sergey, Dr. Sc. (Tech.), professor, Department of environmental technologies, ecology and safety of vital activity, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics. Tel. (057) 702-07-16.  
E-mail: Sergii.Logvinkov@hneu.net.

Borysenko Oksana, PhD (Tech). Associate Professor, Department of environmental technologies, ecology and safety of vital activity, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics. E-mail: Oksana.Borysenko@hneu.net.

Ivashura Andriy, PhD (Agr.). Associate Professor, Department of environmental technologies, ecology and safety of vital activity, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics. E-mail: Andrii.Ivashura@hneu.net.

Popenko Halyna, PhD (Agr.). Associate Professor, Department of environmental technologies, ecology and safety of vital activity, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics. E-mail: Galyna.Popenko@hneu.net.

Статтю прийнято 27.09.2019 р.

## ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

---

УДК 629.054

### THE USAGE OF BOARD COMPUTERS IN TRACTORS

PhD (Eng.) J. R. Kaminski, D. Sc. G. Viselga, D. Sc. (Tech.) Ev. Ugnenko,  
PhD (Tech.) A. Jasinskas, D. Sc. I. Tetsman, PhD (Tech.) O. Tymchenko

### ВИКОРИСТАННЯ БОРТОВИХ КОМП'ЮТЕРІВ У ТРАКТОРАХ

Канд. техн. наук Р. Камінські, д-р наук Г. Віселга, д-р техн. наук Є. Б. Угненко,  
канд. техн. наук А. Ясінскас, д-р наук І. Тетсман, канд. техн. наук О. М. Тимченко

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186408>

---

*The work objective was identification of present state and trends of board computer usage in tractors available in Polish and European market. Automation of construction machines is widely used in land management to improve the accuracy of the marking works during geodetic control. Investigation have included: automatic control of unit monitoring – before and after starting up engine, electronic system of automatic, damage engine switching off; fuel dosage control (engine rotary speed), radar sensor, ventilation; gear box – gear change, gear programming, damage diagnosis; lever – electronic steering system, damage diagnosis, steering keys outside cab. To basic tractor units equipped with electronic steering belong: engine, gear box, lever, live axle, power take off, radar, air-conditioner, planning.*

**Keywords:** tractor, board computer, automatic control in tractors, optimization of parameters.

*У статті розглядається використання бортових комп'ютерів у тракторах. Автоматизація будівельних машин широко використовується в землевпорядкуванні, що підвищує точність виконання розмічувальних робіт при геодезичному контролі. Мета роботи полягала у визначенні сучасного стану і тенденцій використання бортового комп'ютера у тракторах, доступних на польському та європейському ринках. Проаналізовано трактори потужністю двигуна від 60 до 194 кВт компанії Case, Deutz, Fahr, Fendt, New Holland, John Deere, Massey Ferguson, Lamborghini, Valmet, Renault. Дослідження включали автоматичне управління моніторингом агрегату – до і після запуску двигуна, електронну систему автоматичної пошкодження вимикання двигуна; контроль дозування палива (частота обертання двигуна), радіолокаційний датчик, вентиляцію; коробку передач – зміна передач, програмування передач, діагностика пошкоджень; важіль – електронна система рульового управління, діагностика пошкоджень, рульові клавіші поза кабіною. До основних тракторних агрегатів, оснащених електронним рульовим управлінням, належать двигун (автоматичне управління – перевірка встановленого обладнання, контроль дозування палива), коробка передач (зміна, програмування, діагностика пошкоджень), важіль (управління, діагностика пошкоджень), жива вісь (блокування диференціального механізму, привод 4x4 вмикання/вимикання, система управління для блокування та привода 4x4, електронне управління підвіскою передньої осі), вимикання живлення (вмикання/вимикання, регулювання обороту, діагностика пошкоджень), радары*

(вимірювання реальної швидкості руху), кондиціонер, планування (програмування функцій блока, робочих параметрів, надання консультацій). Інші системи, що знаходяться в стадії розроблення і які, як очікується, будуть впроваджені найближчим часом і можуть бути цікавими для польських користувачів з точки зору безпеки праці: сигнальний пристрій ризику балансування трактора, який може бути доданий до незалежного розділу до вимог користувача до трактора або є частиною бортової комп'ютерної системи та електронного блока, що контролює автоматичне кріплення (підвіску) інструментів.

**Ключові слова:** трактор, бортовий комп'ютер, автоматичний контроль у тракторах, автоматизація параметрів.

**Introduction.** Since 1989 in Polish market there have been offered modern tractors, produced by Western companies, equipped with electronic steering and control systems [1, 2]. These systems include microprocessors for particular tractor unit service or board computer (microprocessor, microcomputer) for steering and control of several tractor units. Today, with the wide use of mechanization of works geodetic control is combined with geodetic monitoring for work of executive devices of earthmoving machines at construction of formation. Geodetic monitoring is providing installation and moving executive devices of the construction machine in accordance with the specified design position. In Polish agriculture only small percentage of tractors is equipped with such systems.

According to the Institute of Technology and Life Sciences, Mazovian Research Centre in Khudzienko forecast – in the coming years the sale of such tractors in Polish market will be growing, mainly because of the increase of economic and ecological requirements and work quality, comfort of driving and service [3]. It is forcing the technical progress improving tractor designs and adjusting them to new requirements. More and more effective control systems are introduced to improve agricultural tractor usage. Transmission of signals between them (communication) enables realization of complex agro technical operations with quality (precision, accuracy) impossible to be reached by traditional (mechanical) driving systems of tractors and agricultural machinery.

Introduction of numerical techniques, allowing transmission of large number of

information with significantly reduced number of cables was especially important from the point of view of application of electronics in tractors.

Statistic in Figure 1 shows the share of tractor registrations in Poland in 2015 by brand, in percent. The american companies New Holland and John Deere took the two spots at the top of the table, while the Czech brand Zetor was the third largest seller of tractors, claiming 13.47 percent of the polish market [4].

Statistic shows the share of the European tractor market held by the largest tractor brands in 2015. American brand John Deere holds the greatest share of the market, followed by New Holland, Fendt and Massey Ferguson. These four brands combine for more than half the total sales of tractors in Europe. While John Deere was the single brand with the largest share of sales in Europe, although the Case New Holland group (which consists of New Holland, Case IH and Steyr) was the largest group in the market [5].

Computer control systems are going to take over more and more functions, not only in operating, but also in tractor diagnostics. The computer shall not only detect the failure but it shall inform the nearest authorized service to prepare all necessary parts for repair including term of repair the tractor. Further, it shall forecast tractor's failure and informs the operator-owner on time. All these tasks will be simplified by geographical positioning system (GPS) system, which locates the position of the tractor on-line. It is assumed that in the near future, tractor shall be operated by remote control from the control center [6].

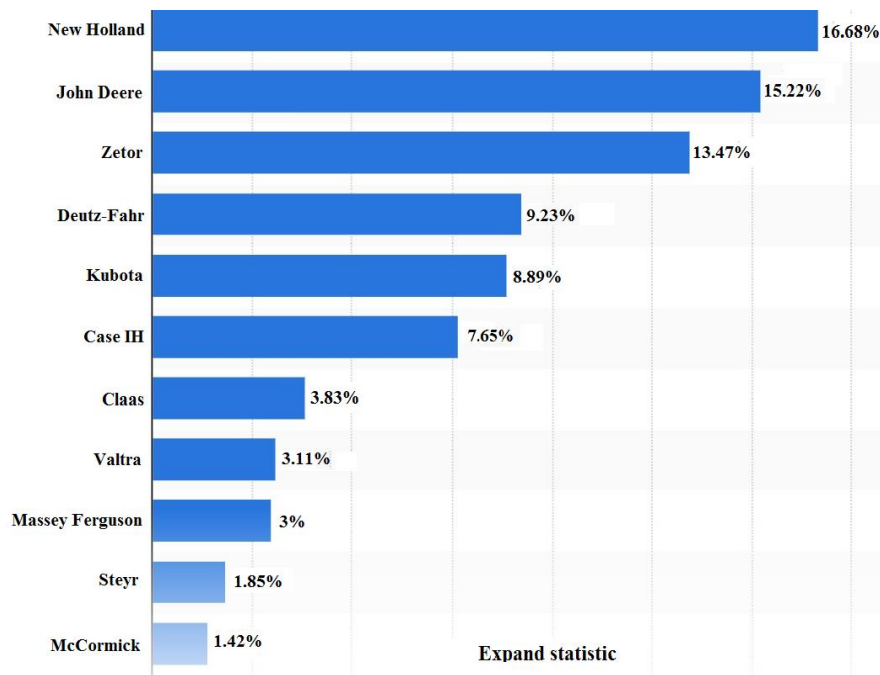


Fig. 1. Market share for brands of tractors in Poland 2015 [4]

**Research objective.** The objective of investigations was a trial of assessment of board computer usage possibility in tractors. The analysis was based on tractors produced by Case, Deutz, Fahr, Fendt, New Holland, John Deere, Massey Ferguson, Lamborghini, Valmet, Renault companies, sold in the largest quantities in the Polish market.

**Analysis.** In tractors the systems of engine, gearbox, hydraulic ram, rear-wheel steering etc. can be linked together by cables transmitting digital data [7]. Steering and control systems located in the machines aggregated with tractor can co-operate with board computer installed in tractor. Usage of electronic system controlling interactions of system including: driver, tractor, machine and soil gives huge possibilities of improvement of aggregate work results, among others by: efficiency increase, fuel consumption decrease. Electronic adjustment of machines requires the compatibility of tractor computer, machine processor, cables and couplings necessary for connection of computer with machine processor to be achieved. Those units have been already standardized, and that is why the tractor may be aggregated with

machines equipped with electronic systems produced by different manufacturers. There are growing possibilities of electronic steering of farm tractor functions in two new technical solutions: system of tractor positioning in the field and system of mutual telecommunication between tractor, machine and office [8]. Recently Companies have demonstrated new tractors with hydrostatic drive and automating steering system without cabs and drivers, but in practice, those systems are not offered in Polish market.

The companies existing in Polish market equip their tractors with computer systems for measurement, registration, monitoring and automatic control of working parameters. In Poland there have been already distributed systems of indicators informing of a tractor malfunction and what is the remedy, as well as diagnostic systems applied in repair shops, simple electronic control devices (e.g. electronic limiter of rotation number, limiter of TUZ-[three point suspension system] upper position), microprocessor systems for several parameters control in particular sets of tractor (e.g. lift, gear box or engine), complex systems for automatic control of tractor-agricultural



machine aggregates with board computers usage with modular structure (with possibility of adding of modules and enlarging by that the range of control) together with steering elements (electric valves, sensors) installed in tractor units and interconnected by a signal transmission bus.

**Electronic units in tractor.** Electronic units in tractor include: tractor's units driving system (engine, gear box, lift, chassis etc.); information, regulation, control (process control, information about switched units, tractor drives, fixed working parameters, gear change, switching in and out of front shaft drive etc.); diagnostics allowing system self-control, analysis and signaling of damages and places of their appearance; management (collection of work results e.g. work time, cultivated area, harvested yield, consumed materials, costs, undertaking of decisions about changes of work regimes etc.); aggregate tractor-machine function connected among others with transmission of data from machine sensors to board computer at tractor and control of aggregate work parameters; satellite system of fixing the machine position on field (satellite navigation); telecommunication system between tractor board computer and stationary computer at the office.

Analysis of existing solutions has shown, that electronic steering systems should have modular structure with mains joining particular modules in one unit, forming integrated (not fully) automatic system of electronic aggregate steering with usage of board computer, as it has been applied e.g. in Lamborghini 165 Racing computer (see Fig. 2). At present the steering is done by comparison of values of different tractor working parameters (e.g. real wheel slippage value, adjustment driving force to optimal value and other parameters and their optimization), as the optimization criterion there is often used the efficiency maximization or fuel consumption minimization.

The main factor deciding of the working quality of automatic systems applied in farm machinery driving units is the quality of signal provided by a head unit [9]. Taking into

account disturbances factors, maximal accuracy of machinery positioning is situated in the range from 3 to 5 meters. For improvement of accuracy positioning, correction signals are utilized. John Deere Company has its own StarFire correction network and makes accessible free of charge correction signal SF1, which makes possible to evaluate certain placement with accuracy of 30 centimeters. For signal SF2 with 10 centimeters accuracy of placement, customers have to pay for this service. But by providing private reference station RTK, it is possible to obtain 1 to 2 centimeters of accuracy. Receiver iTC makes it possible to receive all tree signals SF1, SF2 I RTK. Definition iTC means, that each standard John Deere receiver is equipped in "Terrain Compensation Module", which makes possible to work on slopes. There are three different guidance systems for driving agricultural machines in the field: Parallel tracking, Universal AutoTrac and AutoTrac. Parallel Tracking is the simplest system for machinery guiding in the field. System operation consists in determination of the first passage and then introduction of machine working width value. This system enables the field works to be done without markers, when visibility is poor and at night.

Universal AutoTrack is equipped with fully automatic machine driving. It consists of an antenna and a screen. Additional element contains a special steering mechanism installed in a steering column and a special card which activates automatic guiding of the machine. AutoTrac system is dedicated to the new farm machinery developed by John Deere and requires the installation of special modules to the hydraulic steering unit to provide parallel driving called AutoTrac Ready.

All systems described above are equipped with the same type of screen GS4, the same receiver StarFire iTC and they can recognize all offered correction signals SF1, SF2, SF3 and RTK. They differ only by the elements installed in a certain model of machinery and certain types of activated options. A selection of accuracy depending on different type of field work is characterized in table 1.



Fig. 2. Lamborghini 165 Racing tractor equipped with board computer (electronic control device):  
 a – control panel showing e.g. witch units are working, gear change, in/of front axis drive, differential mechanism locking, WOM (PTO), work parameters of engine gear box – oil pressure in engine, box, oil temperature, cooling fluid etc. and faults; b – multifunction steering lever – gear change, adjustment of engine rotary velocity, lifting link control; c – engine rotary velocity programmer; d – steering console for front and back WOM (PTO), in/of 4x4 drive, differential mechanism blocking, SBA system; e – lifting link steering panel – up/down, locking, transport, control of up/down speed, adjustment of work parameters (power, position, slippage), alarm, steering keys on wing; f – radar sensor of driving velocity; g – data monitor – shows e.g. tractor velocity, engine and WOM (PTO) rotary velocity, slippage, tool working depth, working width, cultivated area, work period, efficiency etc.; h – camera with monitor for machine watching from tractor back. Source: own elaboration

Table 1

Accuracy selection depending on different types of field work [10]

AutoTrac option	Optimal to:	Correction signal	Accuracy
AutoTracSF1	Tillage Fertilization Spraying	SF1 (free of charge)	+/-33cm +/-16,5cm +/-11cm
AutoTracSF2	Planting/sowing Spraying/fertilization Harvesting	SF2 (subscription)	+/-10cm +/-5cm +/-3,5cm
AutoTrac RTK	Planting Deep tillage Repeatable intertillage	RTK (single activation)	+/-2cm Repeatable

TPI Company offers parallel navigation system called TOPCO SYSTEM 110 which is dedicated to provide all agriculture field

operations requiring parallel driving as it is shown in Fig. 3,a. Color screen enables field work to be done during a day and at night as

well. Consol system 110 with a screen allows selection of three different ways of work: straight AB, two types of curves or movement along a circle. It is also possible to provide an automatic reversing. On a screen of console, we can find the following information: driving speed, area of cultivated field, number of

passes, number of accessible satellites, deflection from the driving pass. System is equipped in 3 USB connectors type 12 pin DTM06-12S Deutsch and two types of GPS antennas: AGE-1 and AGE-2 with frequency measurement of 20 Hz.



a)



b)

Fig. 3. Positioning system made by TPI Company [11]:  
a – TOPCON System 110; b – TOPCON System 150

Recent solution developed by this company is a precision system of automatic steering called TOPCON System 150 of 2 centimeters accuracy – it is shown in Fig. 3,b. In this solution the newest technology of precise positioning of Japanese corporation TOPCON is applied.

At present the most popular systems applied in tractors available in Polish market are included in the first four groups mentioned above. They will be especially analyzed because of their widest usage. They directly concern the tractor, but not the external systems connected with electronic steering of agricultural machines, satellite navigation, co-operating computers installed in the office. Electronic linking of tractor units (assemblies) enables creation of work control system almost in an optimal way. To achieve this goal, the units should be arranged in the way enabling measurement of characteristic parameters to be done and they should be equipped with control devices as well. The very essential elements of electronic systems are indicators and instruments for measurement of functional parameters, being the input data for control systems. Quality of control and steering

significantly depends on quality and reliability (stability) of sensors and gauges. In a lot of cases just only placement of sensors or gauges has caused particular technical problems, connected e.g. with space they are to be located, structural limitations of tractor's construction, tractor units, measuring instruments size and reliability (stability): technical quality and measurement precision (e.g. fuel consumption gauge, sensor on shafts working in oil etc.).

**Engine electronic systems.** Engines are equipped with electronic injection system to control and steer the engine work by proper fuel dosage that allows reduction of both – fuel consumption and harmful chemical compounds emission to the environment – to be achieved. It is automatically done, without any operator invention. Realization of such steering standard requires installation of about 20 sensors in the engine to measure its work (oil pressure in engine, gearbox, oil temperature, cooling liquid, etc.). Modern tractors are equipped with electronic acceleration systems with manual control. An operator adjusts the engine rotary speed by the use of switches buttons, and through the

control unit. Such an engine revolution adjustment allows you to save and switch on the minimal or maximal revolutions, temporal keeping of preset revolutions and to return, by pressing push-return button, to acceleration control by means of the accelerator pedal.

Additionally, tractors are equipped with electronic units with automatic adjustment of gearbox ratios according to tractor speed and wheel slip. Switching of gear is done by signal transmission (by key push) to microprocessor, which completes calculations and switches adequate pair of gear-wheels with hydraulic steering. Some tractors of SAME company are equipped with MULTISPEED gear boxes, where engine output power is controlled by electronic steering system, sending adequate data to the central unit. Depending on engine power the steering system sets up the proper work mode – SOFT (economical) or HARD (maximal possibilities). If steering system discovers errors (damaged coil of electronic control valve, locked key, lack of engine power) it signals them by code. Usage of gear box MULTISPEED (switches MULTISPEED) enables constant power flux transferred from engine to gear box and tractor wheels, allowing for efficiency increase, operation time shortening, and by the same – fuel and costs reduction. Selection of adequate mode of gear work, range, speed, drive direction is done by keys without pushing the accelerator (under load).

In case of automatic gears, steered by AUTOMATIC-POWER-SHIFT system e.g. in DEUTZ-FAHR company tractors (Agrotron 160, 175, 200) it is not only possible to select gear work mode ECO (economical) or POWER (maximum of possibilities), range of speeds (gear group), particular gear, drive direction but also to programme gear box in such way, that gear can be directly switched or can be reduced – e.g. gear in upper range of speeds above which system does not change the gear.

In Polish market a share of tractors with four-wheel drive is growing. In typical solution invariable position in front axle drive is used, and difference of wheel peripheral

speed in relation to rear axle should range from 1 to 5 %. It causes tensions in driving unit between front and rear axle, reducing the transferred power. For reduction of power losses in driving unit the special electronic sensors are used allowing switching on or off by clutch of front axle hydraulic drive in the moment of tension appearance. In standard-equipped tractors an operator must often switch on and off gear drive and lock differential mechanism manually by lever as well as to lock differential mechanism. Usage of front axle drive and differential mechanism locking is necessary during work in bad adherence conditions, during field works, with high wheels turn, work on slopes, driving on damaged ground or road surface. For that reason, tractors are optionally equipped with front drive and electro-hydraulic interlocking of differential mechanism switched on by pressing the keys. However, an operator has still often had to connect and disconnect front drive and locks. To avoid the above inconvenience, the tractor may be equipped with electronic steering system e.g. SBA System Control in tractor of LAMBORGHINI (e.g. 165, 190 Racing), where automatic control of two functions appears simultaneously. Four-wheel drive is typically switched on during field works and automatically switched off when tractor speed equals 15 km/h. Differential mechanism is usually locked, lock is released when asymmetric braking up appears, speed exceeds 15 km/h, wheel turn exceeds 20° angle at speed lower than 10 km/h or turning has angle greater than 50° at speed exceeding 10 km/h. Given ranges of speeds and angles are connected with calculated hysteresis curve and when the next locking condition of differential mechanism occurs, locking appears when tractor speed is lower than 2 km/h or turn angle is smallest than 30°. Thanks to that tractor does not lose its controllability during work on heavy soils. When necessity of turning with angle exceeding 20° appears, then automatic unlocking of differential mechanism occurs and possibilities of tractor

handling are increased. When SBA system key is switched off, direct drive on four wheels and differential locking is manually started by electro-hydraulic lever and even the tractor is equipped with steering unit SBA, it does not meet any control function. When SBA is switched on, the system launches power to front axle and it locks differential mechanism according to tractor speed and turn the angle of front wheels irrespective of the position of the lever for electro-hydraulic unit steering. When SBA is switched off the locking and front drive mechanisms are switched on according to lever position, so one must be careful during e.g. system switching off with high speed, when lever is in position of front drive switching on.

In modern tractors lift is adjusted by electronic unit from steering panel. Electronic steering unit is standard version or it is included to the system together with electronic steering of acceleration (engine revolutions) and gear box. In this case the tractor is equipped with multi-functional steering lever. Lift switches are also included in the system which, in dependence of work mode, controls electro-hydraulic valves of lifting system on basis of information transmitted from sensor. System consist of: steering unit, steering panel, electro hydraulic valves, hydraulic pump, power and position indicators, radar or wheel circular speed indicators, keys for lifting/lowering on wing for steering outside cab. System allows for lift steering in aspect of power, position and slippage. Steering unit is working in different modes: locking, transport, stopping, steering of smooth acceleration, slowing down, lifting/lowering, alarm, testing (used only in repair workshops). Each of three functions (power, position, slippage) can be chosen as main or auxiliary one, or not chosen at all. Computer controls the work parameters according to the above selection. The system gives diagnosis of steering unit damages (memory error, programming, electric), sensors (damage, disconnection), cables (main damage, disconnection), electric valves coils (short-circuit, disconnection). It is easy to

locate damage and eventually try to maintenance – when sensor is disconnected, steering valve, cables are wrong connected, there is a lack of power, cable is broken; in other cases, one should ask service for help.

Besides the above mentioned units' tractors are equipped with electronic steering units: PTO in/off, indicating its starting up, automatically disconnecting PTO when engine stops, switching over of revolutions between 540, 750, 100, 1400 in normal or economical mode (in dependence of what is available at tractor), informing on digital screen about PTO rotary speed calculated on electronic unit on basis of engine revolutions and indicating system damages. Companies also equip some of their tractor models with automatic damage engine switching off system. For example, in CASE tractors (7200 type) digital control system is checking oil pressure in engine, oil temperature in gear box, oil pressure in gear box as well as cooling fluid temperature. If one of the mentioned parameters is not proper, than digital control unit shuts electricity intake to electromagnetic valve at injection pump and fuel in flow to the engine is stopped. System has locking unit switching off electronic control as well as indicators and acoustic signals connected with engine state in aspect of mentioned parameters. Moreover, for measurement of real driving speed radar sensors are used, what allows on precision determination of percentage value of wheel slippage in any work conditions. Percentage value of slippage is presented graphically on digital display in form of bar chart. Keeping up of recommended slippage allows for improving work efficiency, precision of dosage of e.g. chemical means, seed sowing and by the same results in reduction of costs and environment protection.

As regards other electronic systems there are used systems for front axle spring stiffness control, electronic adjustment of cab air-conditioner or in lever – electronic control of the tool during transport automatically lifting/lowering mounted tool for tractor stabilization within driving on a road. Other

electronic control units automatically check the tractor units (sets, drives) work. The state of controlled units is illustrated by the control lights and bar charts. System is checking and displaying information about such parameters as: switched gear, driving speed, wheel slippage, engine rotary speed, PTO rotary speed, moto-hours number, service period, working width, efficiency per hour, cultivated surface, work time and others.

Among electronic systems of automatic steering used at present in tractors there are also system advising driver in selection of the best steering solution. Such systems are not only measuring and monitoring parameters of tractor work, but are also assessing parameter values, for which the best technical and economic indicators are reached according to chosen criteria and with tractor loading (engine, driving units). Next they are indicating to driver, which operation should be done for tractor changing over from present parameters to optimal ones. For that reason, electronic system is calculating criterion indicator value for sequence of tested parameters and calculates it optimal value according to the program. After that system is informing driver about calculation results in form adequate for direct usage. Driver is undertaking decision. Such decision aiding systems are offered among others by such Western companies as: Datatronic, Uni-Control, Spartronic or Hessel.

**Solutions under development.** Other systems being under development and expected to be implemented in near future and which can be interesting for Polish users in aspect of work safety are: signaling device of tractor balance risk (aggregate), which can be independent section added on user requirement to tractor or being a part of board computer system and electronic unit controlling automatic mounting (suspension) of tools. Linking of tools and machines with tractor is

operation often done and quite dangerous. Although automatic linking makes this operation easier, but it requires precise tractor access to the machine or tool. Such access in case of limited area of tractor handling is difficult and time-consuming. These disadvantages are eliminated by electronic device, enabling measurement of the distance between tool and tractor and by calculation of tractor turn angle by board computer, necessary for proper access to the tool, allowing for the automatic mounting.

Further possibility is idea of computer design with step-less adjustment of drive of all wheels in which mechanical system is substituted by hydrostatic drive. Electronic adjustment controls the hydraulic unit utilized to drive moment division according to load on both tractor axles. In that way step-less change was reached between front and rear axles.

Next step will be implementation of step-less tractor speed adjustment with usage of hydrostatic driving (hydraulic), next by elimination of cab and operator receiving of fully automated tractor with remote starting up and control. But at present and in near future in Polish agriculture the most important will be tractors equipped with electronic systems.

**Conclusions.** On basis of above analysis units (sections) with electronic steering were chosen as having a possibility of wider use in tractors on Polish market at present and in near future as follows: 1 – engine (automatic control – installed equipment test, fuel dosage control); 2 – gear box (change, programming, damage diagnosis); 3 – lever (control, damage diagnosis); 4 – live axle (differential mechanism locking, in/off 4x4 drive, control system for locking + 4x4 drive, electronic control of front axle suspension); 5 – power take off (in/off, revolution adjustment, damage diagnosis); 6 – radar (measurement of real driving speed); 7 – planning (programming of unit functions, working parameters, advising).

### References

1. Kamiński J. R. Wyposażenie ciągników w komputery pokładowe. *Technika Rolnicza*. 2001. no 5/2001. P. 26-27.



2. Kamiński J. R. Komputery pokładowe w maszynach rolniczych. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*. 2002. no 7/2002. P. 2-6.
3. Kamiński J. R. Ocena ekonomiczno-praktyczna stosowania i wykorzystania komputerów pokładowych w ciągnikach rolniczych. Problems of construction and exploitation of machinery and agricultural equipment: Proceeding of X International symposium of prof. Czesław Kanafojski, 18-19 September 2006. Warsaw : Polytechnic, 2006. P. 91-94.
4. Percentage of Polish tractor market held by brands in 2015. Statista. The Statistics Portal. URL: <https://www.statista.com/statistics/643824/tractor-brands-market-share-poland> (last accessed: 10.09.2019).
5. Proportion of tractor sales in Europe by brand in 2015. Statista. The Statistics Portal. URL: <https://www.statista.com/statistics/643620/european-tractor-market-by-brand> (last accessed: 10.09.2019).
6. Filipović D., Košutić S., Gospodarić Z., Pliestic S., Grbavac V. Constructional Characteristics of the Agricultural Tractors at the Beginning of the 21st Century. *Strojarstvo*. 2008. № 50 (5). P. 277-285.
7. Jakliński L. Mechanika układu pojazd – teren w teorii i badaniach. Warsaw : Polytechnic, 2006. 171 p.
8. Skrobaccki A., Ekielski A. Pojazdy i ciągniki rolnicze. Warsaw : Wieś Jutra, 2006. 248 p.
9. Dreszer K. Globalny system pozycjonowania i możliwości wprowadzenia go w polskim rolnictwie. *Inżynieria Rolnicza*. 2005. no 10. P. 57-63.
10. John Deere, Precision AG Technology. URL: <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/#/apply> (last accessed: 12.09.2019).
11. TPI. Zaufanie stabilność doświadczenie. RTK. URL: <https://www.tpi.com.pl/pl/rtk> (last accessed: 12.09.2019).

---

Kaminski Jan Radek, PhD (Eng.), Senior Research Associate, Faculty of Chemistry, Warsaw University of Life Sciences. E-mail: [jan\\_kaminski@sggw.pl](mailto:jan_kaminski@sggw.pl).

Viselga Gintas, D. Sc., Associate Professor, Vice-dean of Faculty of Mechanics, Department of Mechanical and Material Engineering, Vilnius Gediminas Technical University. E-mail: [gintas.viselga@vgtu.lt](mailto:gintas.viselga@vgtu.lt).

Uglenko Evgeniya, D. Sc. (Tech.), Professor, Head by Department of Researches and Designing communications, geodesy and land management, Ukrainian state university of railway transport. E-mail: [uglenko.ievgenia@gmail.com](mailto:uglenko.ievgenia@gmail.com).

Jasinskas Algirdas, PhD of Technological sciences, Professor, Chief researcher, Institute of Agricultural Engineering and Safety, Vytautas Magnus University. E-mail: [algirdas.jasinskas@asu.lt](mailto:algirdas.jasinskas@asu.lt).

Tetsman Ina, D. Sc., Associate Professor, Vice-dean of Faculty of Mechanics, Department of Mechanical and Materials Engineering, Vilnius Gediminas Technical University. E-mail: [ina.tetsman@vgtu.lt](mailto:ina.tetsman@vgtu.lt).

Tymchenko Olha, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Researches and Designing communications, geodesy and land management, Ukrainian state university of railway transport. Tel. 19-56. E-mail: [oleka55@gmail.com](mailto:oleka55@gmail.com).

Камінські Радек, канд. техн. наук, старший науковий співробітник хімічного факультету Варшавського університету наук про життя. E-mail: [jan\\_kaminski@sggw.pl](mailto:jan_kaminski@sggw.pl).

Віселга Гінтас, д-р наук, доцент, заступник декана механічного факультету, кафедра машинобудування та матеріалів, Вільнюський технічний університет ім. Гедімінаса. E-mail: [gintas.viselga@vgtu.lt](mailto:gintas.viselga@vgtu.lt).

Угненко Євгенія Борисівна, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: [uglenko.ievgenia@gmail.com](mailto:uglenko.ievgenia@gmail.com).

Ясінскас Алгірдас, канд. техн. наук, професор, головний науковий співробітник Інституту сільськогосподарської техніки та безпеки, Університет Вітовта Магнуса. E-mail: [algirdas.jasinskas@asu.lt](mailto:algirdas.jasinskas@asu.lt).

Тетсман Іна, д-р наук, доцент, заступник декана механічного факультету, кафедра машинобудування та матеріалів, Вільнюський технічний університет ім. Гедімінаса. E-mail: [ina.tetsman@vgtu.lt](mailto:ina.tetsman@vgtu.lt).

Тимченко Ольга Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: [oleka55@gmail.com](mailto:oleka55@gmail.com).

Статтю прийнято 10.09.2019 р.

**ТЕПЛОТЕХНІКА (144)**

---

УДК 697.92: 697.95

**МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОГІСНОГО СТАНУ ТУНЕЛІВ КП  
«КИЇВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН» ВПРОДОВЖ КАЛЕНДАРНОГО РОКУ**

Д-р техн. наук П. Г. Круковський, старш. наук. співроб. А. І. Дейнеко,  
інж. В. С. Олійник, мол. наук. співроб. Д. І. Скляренко

**MODELING THE WET CONDITION OF TUNNELS KP «KIEV METRO»  
IN THE CALENDAR YEAR**

**D. Sc. (Tech.) P. G. Krukowsky, Senior Research A. I. Deineko,  
Senior Research V. S. Oliinyk, Junior Researcher D. I. Skliarenko**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186422>

---

*Проведено аналіз експериментальних значень відносної вологості тунельного повітря службових з'єднувальних гілок (СЗГ) КП «Київський метрополітен» при діючих режимах роботи тунельної вентиляції впродовж 2018 року. З метою дотримання нормованого значення вологості тунельного повітря 75 % побудовано комп'ютерну модель тепловологого стану тунелів, що включає до себе геометричну, фізичну та математичну моделі. Верифікація комп'ютерної моделі була проведена з використанням експериментальних даних за 2018 рік. Моделювання тепловологого стану тунелів СЗГ впродовж календарного року показало, що запропонована зміна режимів роботи вентиляційних установок впродовж літнього періоду з видалення на нагнітання дасть змогу знизити відносну вологість повітря нижче 75 %. Результати моделювання були підтверджені експериментальними випробуваннями в Київському метрополітені та впроваджені для використання впродовж усього календарного року.*

**Ключові слова:** метрополітен, тунелі, службова з'єднувальна гілка, вологість, вентиляція, моделювання.

*The analysis of the experimental values of the relative humidity of the tunnel air of the service interconnect lines (SIL) of the Kyiv Metro KP under the existing tunnel ventilation operating modes during 2018. It has been established that during the summer period the value of the relative humidity of the tunnel air exceeds the standard value of 75 % under the current operating modes of tunnel ventilation, when the air is pumped in from the stations and removed from the tunnels into the environment.*

*To solve the problem, a computer model of the heat and humidity state of the tunnels was built, which includes geometric, physical and mathematical sub models. The geometric model on a 1: 1 scale reflects the length of the 2.5 km tunnels and their spatial orientation and consists of 1.5 million cells. The physical model is a set of physical processes that take place in SIL tunnels: the processes of movement and mixing of external and wet tunnel air, heat transfer between the tunnel air and the rim of the tunnel wall, the processes of evaporation and condensation of water. These physical processes are described by differential equations of heat conduction, motion, energy, heat transfer, which are used to calculate the temperature, velocity fields for three*



components along the directions of  $x$ ,  $y$ ,  $z$  coordinates, pressure and humidity. The thermogasdynamic and humidity model was developed using the Ansys CFD software. Verification of the computer model was carried out using experimental data for 2018. Unknown tunnel air flow rates were determined by the computer model parameters identification. When modeling the heat and humidity state of the tunnels, the thermal inertia of the soil layer around the tunnels was taken into account.

Simulation of the heat and humidity state of the SIL tunnels during the calendar year showed that a change in the operating modes of ventilation units during the summer period, when air from the environment is pumped into the tunnel and removed from the tunnels by station fans, will reduce the relative humidity below 75 %. The simulation results were confirmed by experimental tests in the Kiev metro and introduced for use throughout the calendar year in the future.

**Keywords:** metro, tunnels, service branch line, humidity, ventilation, modeling.

**Вступ.** Службові з'єднувальні гілки (СЗГ) призначені для з'єднання різних ліній метрополітену між собою, іноді до СЗГ відносять гілки в депо і ділянки з'єднання з залізницею. У Київському метрополітені СЗГ з'єднують три станції: «Хрещатик», «Майдан Незалежності» та «Кловська» (рис. 1). Для пасажирських перевезень СЗГ в Київському метрополітені не використовуються. Від початку введення в експлуатацію СЗГ-1 з 70-х та СЗГ-2 з 80-х років ХХ століття застосовуються виключно в службових цілях: перегін вагонів з однієї робочої гілки на іншу, проїзд до вагоноремонтного заводу, планове проходження колієвимірального вагона по всіх лініях тощо. Передбачена система тунельної вентиляції СЗГ повинна забезпечувати вологість тунельного повітря не вище нормованого значення 75 % [1]. Проте майже щороку протягом весняно-літнього та частково зимового періодів вологість повітря СЗГ суттєво перевищувала норму. Волога в тунельне повітря надходить від випаровування протікання води через нещільності оправи стінок тунелів, калюж колійних лотків, при митті тунелів, води при вологому прибиранні станцій, від пасажирів.

Реконструкція системи тунельної вентиляції СЗГ, що полягала в заміні вентиляційних установок № 115 і № 229 на сучасні високотехнологічні Zitron, останній раз була проведена у 2004 році, і на основі рекомендацій проектною організацією було

складено нові графіки роботи системи тунельної вентиляції для кожної з ліній метрополітену, дотримання яких не вирішило проблеми високої вологості тунелів СЗГ.

З 2007 року для обслуговування зеленої гілки метрополітену додатково було введено в дію депо «Оболонь», після чого інтенсивність руху електричних потягів через СЗГ знизилась від кількох разів на день до двох разів на місяць. Внаслідок цього в літній період відносна вологість стала зростати до 100 % (явище туману) з конденсацією вологи на оправі стінок тунелів та електричному обладнанні, розташованому на цій ділянці.

Внаслідок високої вологості тунельного повітря значно пришвидшуються процеси руйнування оправи стінок тунелів і корозії дорогого обладнання системи електропостачання СЗГ, що у свою чергу призводить до зростання грошових витрат з бюджету метрополітену на ремонти і заміну обладнання. Найбільших збитків через високу вологість тунельного повітря може завдати коротке замикання електрообладнання СЗГ, що у свою чергу може стати причиною зупинки руху потягів на найближчих ділянках робочих колій. Тому в сучасних умовах для КП «Київський метрополітен» гострою проблемою є забезпечення неперевищення нормованого значення вологості тунельного повітря СЗГ.

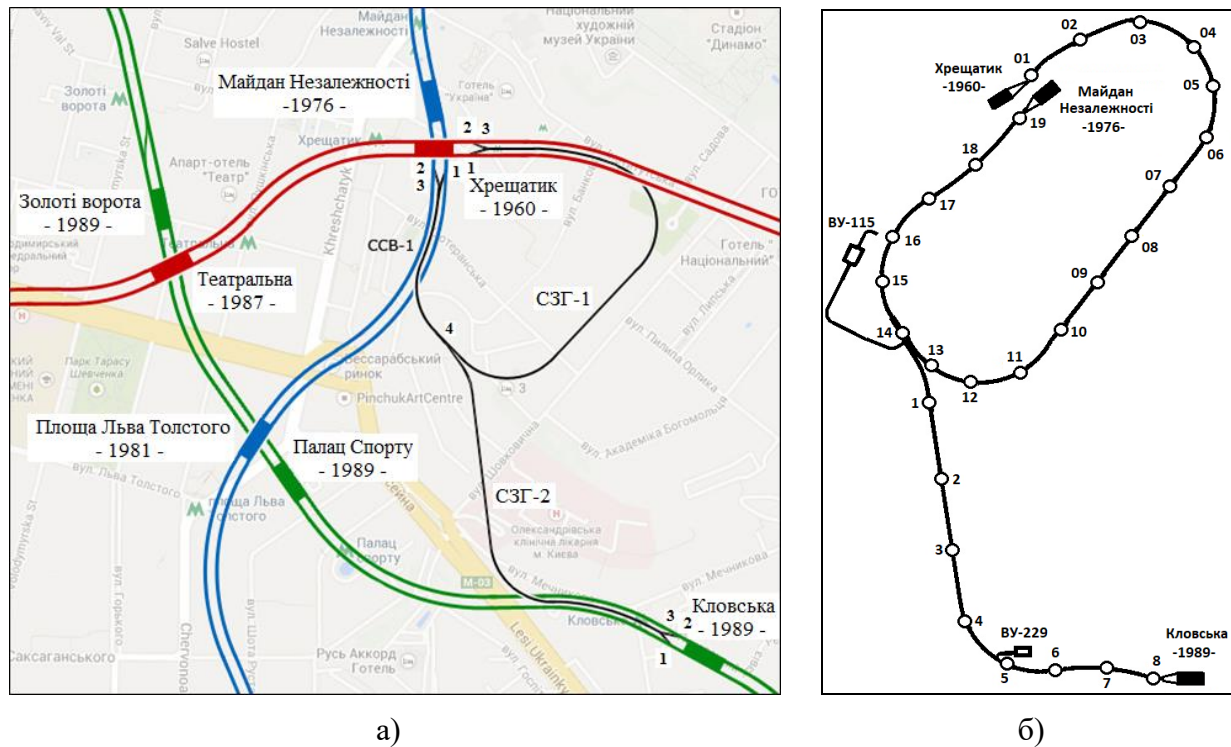


Рис. 1. Схема СЗГ метрополітену: а – схематичне розташування СЗГ між станціями метрополітену: 1-4 – номери стрілок колій; Хрещатик-1960 – назва станції метрополітену та рік побудови відповідно; б – розмітка пікетів СЗГ: 01-19 – номери пікетів СЗГ-1; 1-8 – номери пікетів СЗГ-2

Загалом на будівельних об'єктах з метою зниження вологості повітря застосовують методи адсорбції та конденсації з системами рекуперації енергії [2]. З огляду на обмежене фінансування КП «Київський метрополітен» вказані методи не будуть розглядатися. Таким чином, необхідно зменшити вологість тунельного повітря СЗГ до нормованого значення 75 % або нижче на базі існуючої системи тунельної вентиляції без додаткових затрат – оптимізувати роботу системи тунельної вентиляції СЗГ.

Механічна система тунельної вентиляції СЗГ складається з двох перегінних вентиляційних установок № 115 і № 229 і трьох станційних (рис. 1,б). Робота системи тунельної вентиляції регламентована відповідним графіком, у якому залежно від значень температури і відносної вологості навколишнього середовища для ВШ

регламентовано 8 режимів роботи. Реверсивність механічної системи вентиляції метрополітенів полягає в тому, що зовнішнє повітря в теплий період року нагнітається в тунелі через станційні вентиляційні установки та/або похилі тунелі ескалаторів і видаляється на поверхню через перегінні вентиляційні установки, а в холодний період року навпаки.

З аналізу отриманих від КП «Київський метрополітен» експериментальних даних з абсолютної вологості повітря в тунелях СЗГ за 2004-2017 роки авторами статті висунуто припущення про можливість зниження вологості в тунелях впродовж літнього періоду (з квітня по жовтень) шляхом нагнітання повітря з навколишнього середовища з меншою середньою абсолютною вологістю 7,2 г/кг у тунелі метрополітену, де тунельне повітря має

більше середнє значення абсолютної вологості 10,3 г/кг (рис. 2), що повинно

призвести до зниження вологості тунельного повітря.

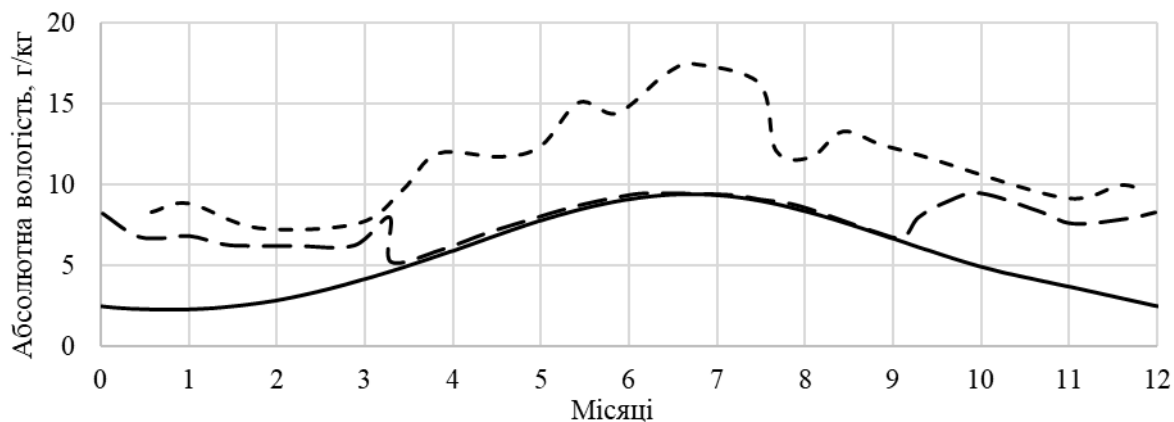


Рис. 2. Зміна абсолютних вологостей у навколишньому (—) і тунельному повітрі впродовж календарного року: - - - — при старому режимі провітрювання; — — — — при новому режимі провітрювання

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перевірити концепцію запропонованого нового режиму роботи тунельної вентиляції СЗГ можна експериментальним методом, який був доступний, але неочевидний для керівництва КП «Київський метрополітен», тому автори роботи вирішили провести комп'ютерне моделювання, дієвість якого підтверджується наведеним нижче оглядом літератури.

Свого часу для розрахунку систем вентиляції метрополітенів була запропонована спрощена методика інженерних розрахунків системи механічної вентиляції тунелів метрополітенів, викладена в монографії В. Я. Цодікова [3]. Ця методика не дозволяє проводити одночасний аналіз теплових, вологісних і газодинамічних процесів тунельного повітря і його теплообмін з масивом землі в річному циклі.

Відомо, що експериментально-розрахунковий метод поєднує переваги обох методів для найбільш ефективного розв'язання задач прогнозування та оптимізації процесів і об'єктів, що досліджуються на основі обґрунтованої схеми експериментальних вимірювань в об'єкті, побудови моделі об'єкта,

адекватність якої забезпечується шляхом максимального наближення розрахункових та експериментальних значень характеристик параметрів і стану об'єкта [4].

У світовій практиці відома робота [5], у якій автори розробили математичну модель і на її основі дослідили зниження вологості повітря приміщень шлюзового обладнання греблі Інсюван шляхом його змішування з зовнішнім повітрям. У роботі [6] на основі CFD моделювання з метою зниження вологості повітряного простору типового для південного Китаю підземного переходу запропоновано новий режим вентиляції повітря з частковою реалізацією методу асиміляції. Проведені експериментальні дослідження на прикладі Z-подібного підземного пішохідного переходу по вулиці Цуйліну міста Ухань підтвердили отримані результати моделювання. Автори роботи [7] з метою дослідження теплообміну між тунельним повітрям і поверхнею тунелю глибокого залягання і врахуванням явища конденсації при цьому розробили числову модель. Отримані результати моделювання були перевірені експериментально, після чого виконано прогнозування вологісного стану

тунелю впродовж 10 років експлуатації. У результаті виконання роботи розроблено практичні рекомендації щодо заходів з безпеки праці. Також відома експериментальна робота [8], у якій встановлено істотний вплив вхідних швидкості та температури зовнішнього повітря на теплообмін під час протікання повітря по тунелях греблі для різних періодів року. Рекомендовано використовувати головний підземний тунель як аналог «грунтового теплообмінника» в системі кондиціювання повітря, для чого запропоновано відповідні режими роботи. У роботі [9] на основі CFD моделювання проведено дослідження різних режимів роботи системи тунельної вентиляції метрополітену з впливом помпового ефекту і без нього. За отриманими результатами було проведено оптимізацію роботи системи вентиляції щодо мінімізації кількості припливного повітря з метою підтримання необхідної температури тунельного повітря в різні періоди та сезони.

Отже, застосування сучасних CFD (Computation Fluid Dynamic) технологій моделювання для різних об'єктів дозволяє здійснювати одночасно розрахунок фізичних процесів, що дає можливість пошуку оптимальних режимів роботи вентиляційних установок для забезпечення

критерію оптимізації – потрібного значення вологості повітря.

**Визначення мети та завдання дослідження.** На основі CFD моделювання виконати прогнозування вологісного стану тунелів СЗГ КП «Київський метрополітен» впродовж повного календарного року при реалізації запропонованого режиму роботи вентиляційних установок тунельної вентиляції в літній період та експериментально підтвердити отримані результати.

#### Основна частина досліджень

**Геометрична модель** тунелів СЗГ побудована відповідно до отриманої від КП «Київський метрополітен» архітектурно-будівельної документації.

Тунелі СЗГ-1 мають протяжність близько 1950 м, СЗГ-2 – близько 850 м, перепад висот колій між найвищою та найнижчою точками тунелів СЗГ складає 73 м. Глибина вентиляційної шахти (ВШ) № 229 становить 47 м; загальна глибина ВШ-115 – 95 м: до поверхні вентиляційного тунелю 50 м і висота над поверхнею ґрунту 45 м (рис. 3, а). За оцінками В. Я. Цодікова [3], теплоакуюлюючий шар землі навколо тунелів глибокого залягання не перевищує 10 м, тому товщину землі навколо тунелю прийнято 10 м (рис. 3, б). CFD модель СЗГ має близько 1,5 млн комірок (рис. 4).

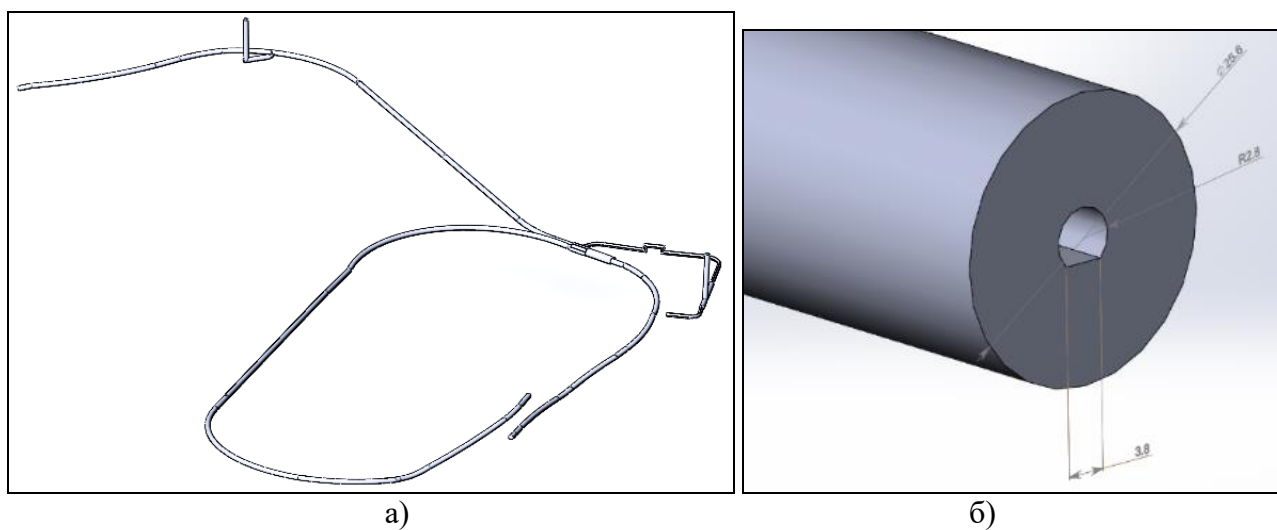
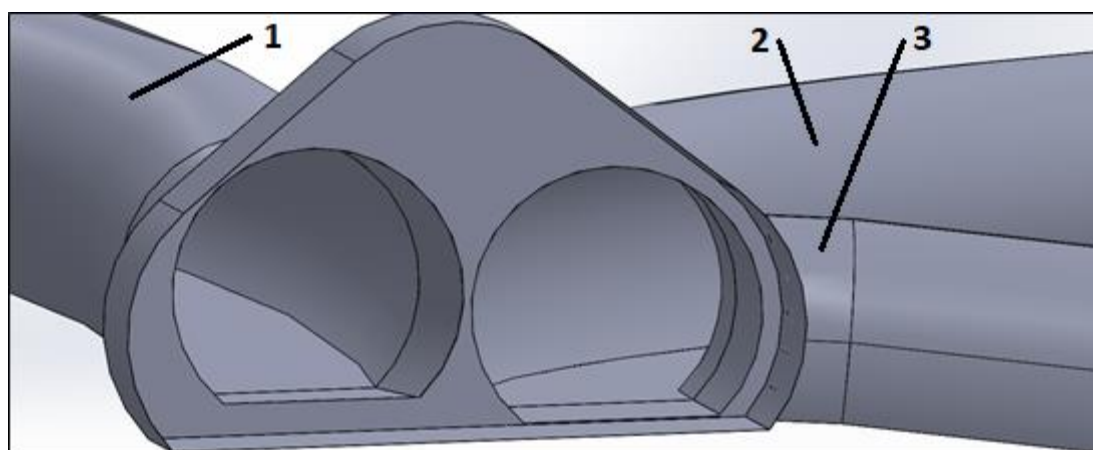


Рис. 3. Геометрична модель СЗГ: а – вигляд геометричної моделі СЗГ зі ст. м. «Хрещатик»; б – вигляд поперечного перерізу моделі тунелю з шаром землі товщиною 10 м навколо нього

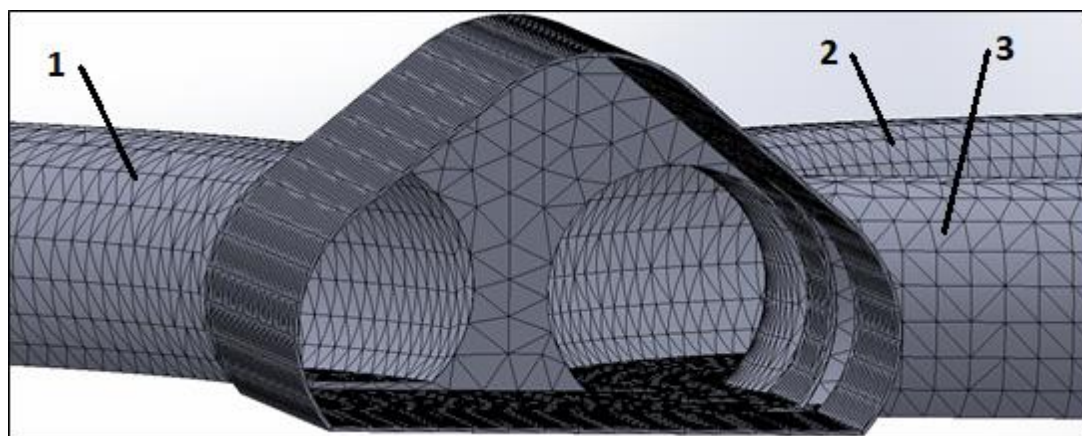




а)



б)



в)

Рис. 4. Фрагмент геометричної моделі роз'їзду СЗГ: а – фото роз'їзду між СЗГ-1 та СЗГ-2; б – вигляд роз'їзду СЗГ без сітки, у якому: 1 – напрямок до ст. м. «Хрещатик»; 2 – напрямок до ст. м. «Кловська»; 3 – напрямок до ВШ-115; в – вигляд роз'їзду СЗГ з накладеною сіткою

**Фізична модель** являє собою сукупність фізичних процесів, які мають місце в тунелях СЗГ: процеси руху і змішування зовнішнього та вологого тунельного повітря, теплообмін між тунельним повітрям та оправою стінки тунелю, процеси випаровування та конденсації води. Вказані фізичні процеси можуть бути описані диференціальними рівняннями теплопровідності, енергії, руху, тепловіддачі [10, 11], за якими розраховуються поля температур, швидкостей за трьома компонентами вздовж напрямків координат  $x, y, z$ , тиску і вологості.

**Математична модель.** Термогазодинамічна і вологісна модель була розроблена з використанням програмного пакета *Ansys CFD*.

Модель відтворює геометрію гілок СЗГ Хрещатик-Роз'їзд-Майдан-Кловська з вентиляційними шахтами ВШ-229 на гілці Кловська-Роз'їзд та ВШ-115 на Роз'їзді. Самі станції та з'їзди з основних тунелей у тунелі СЗГ не враховуються в моделі, таким чином, 3D модель тунелей СЗГ починається за кілька десятків метрів від станцій. Як граничні умови на кінцях гілок використовувались масова витрата або тиск, які забезпечуються станційними вентиляторами. Помповий ефект від руху поїздів не враховувався. Тунелі ВШ є

відгалуженням від тунелів СЗГ і мають довжину в кілька десятків метрів задля досягнення відносно стабілізованої течії повітря. Граничні умови на кінцях ВШ – масова витрата або статичний тиск – відповідають умовам, які забезпечуються вентиляторами ВШ і самотягою через вентиляційну трубу на поверхню. Оцінювання витрат на кожному кінці тунелів СЗГ відбувалось експериментально через заміри середньої швидкості потоку в окремих гілках у місцях зі стабілізованою течією повітря.

З урахуванням особливостей формулювання задачі, а саме руху мас повітря з помірними швидкостями далеко від стінки, була вибрана стандартна  $k-\epsilon$  модель турбулентності. Вибрано Simple алгоритм розв'язання на основі тиску (*pressure-based solver*) з дискретизації першого порядку (*first order upwind discretization*) для імпульсу, тиску, енергії, турбулентності і дисипації, що є достатнім для задач такого масштабу [11].

*Рівняння перенесення Species transport для другого компонента в повітрі (волога)*

Для  $i$ -компонента основної фази (волога в повітрі) рівняння нерозривності матиме такий вигляд і буде доповнено дифузійним потоком  $J$  компонента  $i$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_i, \quad (1)$$

$$\vec{J}_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}, \quad (2)$$

де  $S_i$  – будь-які джерела, що визначаються дослідником (описано нижче);

$Y_i$  – локальна масова частка кожного компонента;

$D_{i,m}$  – коефіцієнт дифузії маси для частинок  $i$  в суміші;

$D_{T,i}$  – коефіцієнт термічної дифузії (у моделі  $D_{T,i} = 0$ );

$Sc_t$  – турбулентне число Шмідта (величина дорівнює 0,7).

Припускається, що густина повітря постійна (нестисливий газ), тому природньою конвекцією знехтувано,  $S_i$  розраховується з використанням UDF.

Інтенсивність випаровування з поверхні води при русі повітря зі швидкістю  $V$  і температурою  $T$  через емпіричну залежність, кг/с [12],

$$g = \theta \cdot A \cdot (H_s - H) / 3600, \quad (3)$$

де  $\theta = 25 + 19 \cdot V$  – коефіцієнт випаровування;

$V$  – швидкість потоку повітря;

$A$  – площа поверхні дзеркала води;

$H$  – поточна абсолютна вологість повітря;

$H_s$  – абсолютна вологість при  $\phi = 100\%$  (при даній температурі), яка справедлива для діапазону температур від 0 до 40 °С, г/м<sup>3</sup> [13],

$$H_s = 5,018 + 0,32321 \cdot T + 8,1847 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 3,1243 \cdot 10^{-4} \cdot T^3, \quad (4)$$

Використання формули (3) із формулою (4) передбачає такі припущення:

1) емпіричний коефіцієнт випаровування  $\theta$ , який був отриманий для випадку випаровування з поверхні дзеркала води, справедливий і для випаровування з поверхні стінок. Проте в тунелях метро розподіл води по периметру поперечного перерізу нерівномірний: знизу можуть бути калюжі, які не поглинаються ґрунтом, а з боків і зверху протічки і тріщини, які пропускають воду, зволожуючи поверхню. Таким чином, джерело вологи за формулою (1) можна назвати еквівалентним. Приведення інтенсивності випаровування в метро до інтенсивності випаровування з площі поверхні дзеркала води можна здійснити, підбравши площу випаровування  $A$ ;

2) діапазон температур, у якому методика вважається робочою, – від 0 до 40 °С. Для цього у свою чергу було прийнято, що повітря, яке входить у тунель із ВШ взимку, встигає прогрітись до температури вище 0 °С;

3) якщо повітря на ділянці тунелю насичене вологою ( $H_s < H$ ), то джерело згідно з формулою (1) має бути негативним. У моделі було прийнято, що в такому випадку джерело дорівнює 0.

4) джерело вологи розраховується як об'ємне, а не поверхневе. Тобто волога, яка випаровується з поверхні, вноситься не в комірки, що біля стінки, а рівномірно в об'єм ділянки. Цим припускається, що дифузія вологи в повітрі (другої фази) дорівнює 1 і в деякому наближенні це є

справедливим для турбулізованих течій, якими і є потоки в тунелях.

Далі формулу (3) слід імплементувати до випаровування з поверхні тунелів у метро. Знаючи швидкість потоку та його температуру, абсолютну вологість, невідомим членом залишається площа поверхні випаровування  $A$ . Вона не дорівнює загальній площі поверхні тунелю, оскільки стінки зволожені нерівномірно, і тип поверхні, або шорсткість, також впливає на швидкість випаровування. Тому площа поверхні випаровування підібрана в CFD моделі з експериментальних даних, які являють собою планові заміри вологості, температури та швидкості повітря, а також температуру стінок тунелів протягом 2013–2014 та 2017–2018 років.

Для приведення одиниць розмірності джерел води для Fluent потрібно  $g$  поділити на об'єм ділянки тунелю метро  $Volume$ .

Площа  $A$ , м, підбирається з виразу, м<sup>2</sup>,

$$A = (Volume/S_{\Pi}) \cdot a,$$

де  $S_{\Pi}$  – площа поперечного перерізу тунелю;

вираз  $Volume/S_{\Pi}$  – довжина ділянки тунелю;

$a$  – коефіцієнт, м<sup>2</sup>/м (площа поверхні випаровування на одному метрі тунелю), підбирається для випаровування та конденсації, використовуючи експериментальні дані.

Остаточне джерело води для Fluent, кг/м<sup>3</sup>·с,

$$G = \left( \frac{(25 + 19 \cdot V) \cdot (Volume/S_{\Pi}) \times}{\times a \cdot ((H_s/(\rho \cdot 1000)) - H)} \right) / Volume,$$

де  $(\rho \cdot 1000)$  – приведення максимальної абсолютної вологості з формули (2) до розмірності кілограм води/кілограм повітря.

Рівняння імпульсів (5):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{\vartheta}) + \nabla \cdot (\rho \vec{\vartheta} \vec{\vartheta}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (5)$$

де  $p$  – статичний тиск;  $\vec{\vartheta}$  – швидкість;  $\bar{\tau}$  – тензор напружень (описано нижче);  $\rho \vec{g}$  та  $\vec{F}$  – сила гравітації та сила зовнішнього тіла відповідно (виникає, наприклад, при

взаємодії з дисперсною фазою).  $\vec{F}$  також містить інші джерела, які визначаються дослідником (дорівнюють 0).

Рівняння енергії

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{\vartheta} (\rho E + p)) = \\ = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{\vartheta})) + S_h, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $k_{eff}$  – ефективна провідність ( $k + k_t$ ), де  $k$  – теплопровідність газу;  $k_t$  – турбулентна теплопровідність, що визначається у відповідності з використовуваною моделлю турбулентності);  $\vec{J}_j$  – дифузійний потік частинок.

Перші три члени у правій частині рівняння являють собою передачу енергії через провідність, дифузію частинок та в'язкість дисипації відповідно.  $S_h$  включає до себе об'ємні джерела теплоти, що дорівнюють теплоті пароутворення (конденсування).

Величина  $E$  визначається за формулою

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{\vartheta^2}{2},$$

де  $h$  – ентальпія, яка визначається для нестисливих газів як

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho},$$

де  $Y_j$  – масова частка компонента  $j$  в повітрі;

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT,$$

де  $T_{ref}$  дорівнює 298,15 К.

Дифузія енергії одночасно з дифузією другої компоненти повітряної фази (вологи) враховується рівнянням

$$\nabla \cdot \left[ \sum_{i=1}^n h_i \vec{J}_i \right].$$

Для стандартної к-ε моделі турбулентності рівняння турбулентності к-енергії така:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \quad (7)$$



де  $\sigma_k$  – турбулентне число Прандтля для турбулентної енергії  $k$ ;

$G_k$  – генерація кінетичної енергії турбулентності за рахунок середніх градієнтів швидкості;

$G_b$  – генерація кінетичної енергії турбулентності за рахунок плавучості;

$Y_M$  – внесок флуктуацій розширення стискуваного середовища до загальної швидкості дисипації;

$S_k$  – додаткові джерела, які можуть бути додатково задані користувачем (рівні 0).

Рівняння  $\epsilon$ -енергії дисипації

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \quad (8)$$

де  $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$  – константи;

$\sigma_\epsilon$  – турбулентне число Прандтля для енергії дисипації  $\epsilon$ ;

$S_\epsilon$  – додаткові джерела, які можуть бути додатково задані користувачем (дорівнюють 0).

Такий підхід дозволив обійти ресурсні обмеження програмного забезпечення Fluent при повному врахуванні цих ефектів як динамічної зміни теплового стану об'єкта залежно від температурного режиму навколишнього середовища та параметрів тунельного повітря на станціях метрополітену.

Прийняті припущення при моделюванні:

1. Припускається, що теплофізичні властивості ґрунту незмінні протягом року [5-9]: густина  $1500 \text{ кг/м}^3$ , теплопровідність  $1,75 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , середня питома ізобарна масова теплоємність  $880 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

2. Абсолютна вологість повітря на вході в роз'їзд з ВШ-115 дорівнює абсолютній вологості повітря на вулиці (джерела вологи в тунелі ВШ-115 не враховані).

3. При моделюванні нагнітання свіжого повітря припускається, що температура повітря, яке виходить із вентиляційних тунелів і надходить у тунелі СЗГ, відразу набуває значення температури тунельного повітря відповідно до значень експериментальних даних.

Для безпосереднього виконання числового розв'язання диференціальних рівнянь – комп'ютерного моделювання – необхідне задавання граничних умов, які характеризують протікання процесів на границях комп'ютерної моделі. З наданої вихідної інформації від КП «Київський метрополітен» і проведених додаткових експериментальних досліджень можна сформулювати граничні умови на межах СЗГ для всіх режимів роботи ВУ: задаються температура, вологість і швидкість тунельного повітря. У результаті моделювання необхідно визначити нестационарні поля температур і відносної вологості тунельного повітря, витрати повітряних потоків за різних режимів роботи тунельної вентиляції.

Аналіз експериментальних даних, отриманих від КП «Київський метрополітен». Починаючи з 2004 року і до сьогодні співробітниками виміральної лабораторії електромеханічної служби (у 2018 році сумісно з авторами статті) проводилися експериментальні дослідження параметрів мікроклімату тунелів СЗГ з урахуванням «помпового» ефекту від руху потягів відповідно до рекомендацій В. Я. Цодікова [3]. Під час вимірювань температури тунельного повітря та поверхні оправи стінок тунелів, відносної вологості та швидкості руху тунельного повітря використовували пірометр testo 835-T1 і термоанемометр testo 435-T1.

З початку 2018 року і до 15 серпня зміна відносної вологості тунельного повітря для різних пікетів по довжині СЗГ відбувалася в досить широких межах – від 60 до 100 %. Такий характер зміни середньої відносної вологості пояснюється нерівномірними розподілами температур тунельного повітря і стінок оправи тунелів і відносної та абсолютної вологості по довжині тунелів СЗГ для вибраних моментів часу, що обумовлювалися можливістю проведення експериментальних робіт. Основною причиною такої зміни досліджуваних параметрів є зміна витрат і напрямку тунельного повітря СЗГ, на що додатково впливає «помповий» ефект і робота системи тунельної вентиляції відповідно до графіка роботи тунельної вентиляції (рис. 2, 5).

Після ввімкнення ВУ 115 в режим нагнітання повітря навколишнього середовища в тунелі СЗГ з 15 серпня 2018 року по 13 листопада 2018 року було досягнуто рівності по довжині тунелів значень температур тунельного повітря і оправи стінок тунелів і відносної та абсолютної вологості, що врешті-решт призвело до меншої зміни параметрів мікроклімату по довжині тунелів СЗГ. Також у період нагнітання повітря ВУ115 наприкінці жовтня відносна середня вологість тунельного повітря знову перевищує нормоване значення і зростає до рівня 80 % (рис. 5, 6), що пояснюється надходженням більш нагрітого вологого повітря зі станцій метрополітену в холодніші тунелі СЗГ.

Як видно з рис. 5, 6, під час осіннього періоду після перемикання ВУ-115 з режиму нагнітання в режим видалення повітря в кінці вересня та на початку жовтня відбулося зростання вологості тунельного повітря вище нормованого значення. Дане явище можна пояснити тим, що запропонований оптимальний режим роботи тунельної вентиляції, з точки зору зниження відносної вологості тунельного повітря, був реалізований у короткі терміни – не з початку квітня по кінець вересня

(суцільна лінія), а фактично з 15 серпня по 13 листопада 2018 року (штрихова лінія).

Таким чином, під час апробації рекомендацій ІТТФ НАНУ з 15 серпня по 13 листопада 2018 року за рахунок нагнітання повітря з навколишнього середовища в тунелі СЗГ вдалося підвищити температуру тунельного повітря, відповідно до цього підвищити температуру оправи стінок тунелів і зменшити абсолютну вологість тунельного повітря. Внаслідок такого поєднання впливу зміни параметрів мікроклімату СЗГ за вказаний період і відбулося зниження відносної вологості.

#### *Результати CFD моделювання.*

Оскільки експериментальні дані параметрів мікроклімату були визначені дискретно по довжині тунелів СЗГ (на деяких пікетах) у певні моменти часу, то для комп'ютерного моделювання середні арифметичні значення параметрів мікроклімату були перераховані на середні об'ємні значення. CFD модель була верифікована на накопичених експериментальних даних за 2018 рік. Як видно з рис. 5, 6, результати комп'ютерного моделювання зміни значень параметрів мікроклімату по ділянках тунелів СЗГ добре узгоджуються з середніми об'ємними значеннями відповідних величин, визначених експериментально. Таким чином, після проведення процедури налаштування (верифікації) комп'ютерної моделі за експериментальними даними була отримана модель, на якій можна проводити прогнозування зміни параметрів мікроклімату тунелів СЗГ і впровадження рекомендацій ІТТФ НАНУ з організації роботи механічної системи тунельної вентиляції впродовж повного календарного року.

На рис. 5, 6 наведені результати комп'ютерного моделювання при роботі системи тунельної вентиляції СЗГ впродовж повного календарного року відповідно до рекомендацій ІТТФ НАНУ. З цих рисунків видно, що в разі дотримання рекомендованих нових режимів роботи

тунельної календарного вентиляції року впродовж середня відносна вологість тунельного повітря СЗГ не буде перевищувати 80 %.

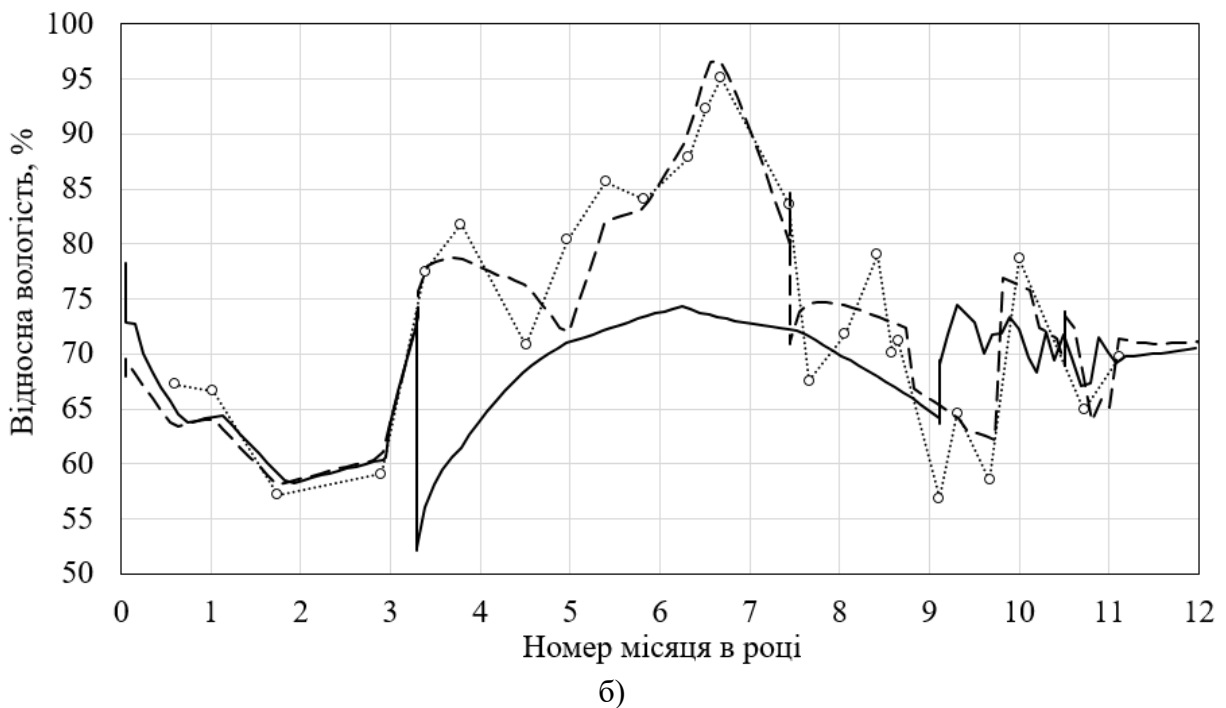


Рис. 5. Зміна середніх об'ємних значень відносної вологості тунельного повітря протягом року на ділянці СЗГ-1:  
 а – від ст. м. «Хрещатик» до Роз'їзду; б – від ст. м. «Майдан Незалежності» до Роз'їзду;  
 - o - – експериментальні значення; -- – розрахункові значення для старого режиму вентиляції; — – розрахункові значення для нового режиму вентиляції

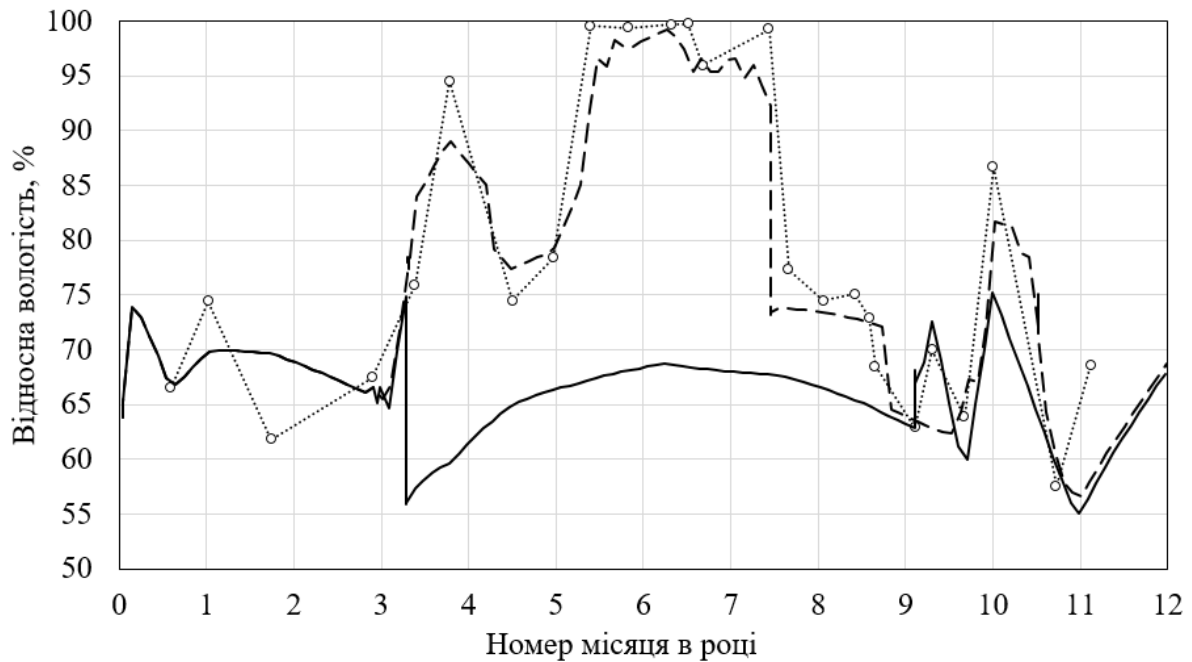


Рис. 6. Зміна середніх об'ємних значень відносної вологості тунельного повітря протягом року на ділянці СЗГ-2 від ст. м. «Кловська» до Роз'їзду:

- ○ - – експериментальні значення; - - - – розрахункові значення для старого режиму вентиляції; — – розрахункові значення для нового режиму вентиляції

Для періоду календарного року, що має межі від початку року до сотого порядкового дня в році (10 квітня), спостерігається поступове зростання середнього значення відносної вологості СЗГ до рівня 80 %. Це пояснюється тим, що на кінець зимового періоду оправа стінок тунелів і шар ґрунту навколо тунелів мають нижчу температуру, ніж температура навколишнього повітря. До того ж під кінець зимового періоду одночасно з цим зростатиме вологість навколишнього повітря, тому при вентиляції тунелів буде відбуватися зниження температури до значення температури тунельного повітря (у випадку переохолодження шару ґрунту навколо тунелів нижче середньої температури можливе зниження температури до значення температури точки роси – явище туману) і, як наслідок, зростання відносної вологості тунельного повітря.

У період календарного року, що починається від сотого дня (10 квітня) по 277 день (5 жовтня), рекомендовано

нагнітати повітря з навколишнього середовища в тунелі СЗГ. Для даного періоду характерним є зростання абсолютної вологості зовнішнього повітря до максимуму та зменшення до рівня весняного, тому відповідно буде змінюватися відносна вологість тунельного повітря СЗГ (рис. 2, 5, 6).

До кінця календарного року в період від 277 дня (5 жовтня) до 365 дня (31 грудня) спостерігається впродовж першого місяця поступове зростання середнього значення відносної вологості до рівня, близького до нормованого значення. Це пояснюється тим, що температура зовнішнього повітря поступово знижується та при вентиляції тунелів СЗГ охолоджуватиме шар ґрунту навколо тунелів. При надходженні більш нагрітого і вологішого повітря зі станцій метрополітену в СЗГ буде відбуватися охолодження такого повітря, що призведе до підвищення середньої відносної вологості (див. рис. 2, 5, 6).

## Висновки

1. Накопичені експериментальні значення параметрів мікроклімату з урахуванням «помпового ефекту» при роботі механічної системи тунельної вентиляції СЗГ відповідно до чинного (старого) графіка роботи тунельної вентиляції, коли провітрювання тунелів СЗГ здійснюється повітрям від станцій метрополітену впродовж календарного року, свідчать про зростання вологості тунельного повітря в літній період до 80-95 %, іноді 100 %.

2. Впродовж літнього періоду запропоновано змінити режими роботи вентиляційних установок тунельної вентиляції СЗГ таким чином, щоб більш сухе і нагріте повітря навколишнього середовища перегінними вентиляційними установками нагніталось в тунелі СЗГ, а видалялося з тунелів станційними.

3. Розроблено CFD модель термогазодинамічного та вологого станів тунелів СЗГ, що являє собою сукупність геометричної моделі та математичний опис фізичних процесів тепломасообміну двофазного середовища. Адекватність CFD моделі була забезпечена використанням експериментальних даних параметрів мікроклімату за 2018 рік. Уточнена модель показала близькість розрахункових і експериментальних значень відносної

вологості тунельного повітря СЗГ при старому режимі роботи вентилювань.

4. На основі верифікованої CFD моделі здійснено прогнозування зміни параметрів мікроклімату впродовж повного календарного року за умови реалізації розроблених рекомендацій ІТТФ НАНУ з організації нового режиму роботи системи тунельної вентиляції СЗГ. На основі аналізу результатів комп'ютерного моделювання встановлено, що для зимового та осіннього періодів середня відносна вологість тунельного повітря СЗГ може досягати нормованого значення 75 або 80 %, впродовж літнього періоду відносна вологість буде нижче 75 %.

5. Отримані результати моделювання термогазодинамічного і вологісного режимів тунелів СЗГ впродовж календарного року підтверджені експериментальним випробуванням в Київському метрополітені.

6. На основі аналізу експериментальних та отриманих розрахункових результатів шляхом комп'ютерного моделювання можна зробити висновок про відсутність необхідності зниження відносної вологості тунельного повітря СЗГ додатковим або іншим обладнанням.

Автори статті висловлюють подяку КП «Київський метрополітен» за фінансову підтримку цієї роботи.

## Список використаних джерел

1. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. МЕТРОПОЛІТЕНИ. [Чинний від 2011-10-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 299 с. (Національний стандарт України).
2. Зниження вологості в тунелях КП «Київський метрополітен» шляхом зміни режимів роботи вентиляційних установок / А. І. Дейнеко, П. Г. Круковський, Д. І. Склярєнко та ін. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 183. С. 35-45.
3. Цодиков В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Недра, 1975. 56 с.
4. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (Общий инженерный подход). Киев: НАНУ, Институт технической теплофизики, 1998. 224 с.
5. YU Yan Shun, QIAN Pu Hua, ZHANG Shao Fan. Development and Validation of Mathematical Model for Tailrace Tunnel Ventilating Process in Hydropower Station. *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications.* 2011. Vol. 71-78. P. 4069-4073.

6. Li X., Qin Y., Wang Y. Natural Ventilating Behavior of Z-Shaped Pedestrian Underpass in Wuhan. In: Zhang D., Huang X. (eds) Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Tunnelling and Underground Construction. GSIC 2018, Springer, Singapore. P. 633-641.
7. Liu X., Xiao Y., Inthavong K., Tu J. A fast and simple numerical model for a deeply buried underground tunnel in heating and cooling applications. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 62. P. 545-552.
8. Ren T., Li A., Lv W. Field and Laboratory Tests and Analyses on Temperature and Relative Humidity in Underground Multi-tunnels. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 205. P. 27-34.
9. Guan1 X., Jiang1 Y., Yao1 Y. CFD simulation of a novel ventilation system of subway station in Harbin. Proceedings: Building Simulation. 2007. P. 432-436. URL: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p445\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p445_final.pdf) (Last accessed 24.04.2018).
10. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учеб. для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. Москва: Энергоиздат, 1981. 416 с.
11. ANSYS FLUENT 17. Documentation. URL: <http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/martoran/NotasModelosGrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%202015.pdf> (Last accessed 24.04.2018).
12. Engineering ToolBox, (2004). Evaporation from Water Surface. URL: [https://www.engineeringtoolbox.com/evaporation-water-surface-d\\_690.html](https://www.engineeringtoolbox.com/evaporation-water-surface-d_690.html) [Last accessed 28.02.2019].
13. Hyperphysics, (1998). Relative Humidity. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/relhum.html> [Last accessed 28.02.2019].

---

Круковський Павло Григорович, головний науковий співробітник, завідуючий лабораторією моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки, інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: [kruk\\_2@ukr.net](mailto:kruk_2@ukr.net).

Дейнеко Андрій Іванович, старший науковий співробітник, лабораторія моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки, інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: [andriideineko@gmail.com](mailto:andriideineko@gmail.com).

Олійник Владислав Сергійович, інженер I категорії, лабораторія моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки, інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: [oliinyk-vlad@ukr.net](mailto:oliinyk-vlad@ukr.net).

Скляренко Дмитро Ігорович, молодший науковий співробітник, лабораторія моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки, інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81.

E-mail: [cklyr90@bigmir.net](mailto:cklyr90@bigmir.net).

Krukovskiy Pavlo Grihorovich, chief scientist, Head of the laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: [kruk\\_2@ukr.net](mailto:kruk_2@ukr.net).

Deineko Andrii Ivanovich, senior research, laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: [andriideineko@gmail.com](mailto:andriideineko@gmail.com).

Oliinyk Vladyslav Serhiyovich, engineer of 1<sup>st</sup> category, laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: [oliinyk-vlad@ukr.net](mailto:oliinyk-vlad@ukr.net).

Skliarenko Dmytro Igorovich, junior researcher, laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: [cklyr90@bigmir.net](mailto:cklyr90@bigmir.net).

Статтю прийнято 04.09.2019 р.

**ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАСПОРТ (273)**

---

УДК 656.075

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ЗАПАСІВ РЕСУРСІВ У ЛОКОМОТИВНОМУ ДЕПО**

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, асп. Д. Е. Сулежко, магістрант Є. Ю. Кузьмін

**DETERMINATION OF OPTIMAL RESERVES OF RESOURCES IN A LOCOMOTIVE DEPARTMENT**

Dr. Sc. (Tech.) O. Krashenin, postgraduate student D. E. Sulezhko, master E. Y. Kuzmin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186434>

---

*Поступовий перехід економіки на ринкові відносини передбачає впровадження логістичних принципів в усі гілки господарства. Необгрунтовані розміри запасів на підприємстві можуть спричиняти невиправдані витрати на його утримання або втрату якості. У статті аналізується зв'язок між розміром замовлення для поповнення запасів локомотивного депо і часом наступного замовлення з метою визначення його оптимального обсягу і часу виконання замовлення.*

**Ключові слова:** запас, розмір замовлення, час виконання замовлення.

*Stocks play both a positive and a negative role in the activities of the logistics system. The positive role is that they ensure the continuity of the processes of procurement, production and marketing of products, being a kind of buffer that smooths out unforeseen fluctuations in demand, violation of the timing of the supply of resources, increase the reliability of logistics management. The negative side of stocks is that significant financial resources are immobilized in them, which could be used by enterprises for other purposes, for example, investment in new technologies, market research, improving the economic performance of an enterprise, etc. In addition, large levels of stocks of finished goods impede the improvement of its quality, since the company is primarily interested in the sale of products before investment to improve its quality. The presence of significant reserves in the areas of procurement, production and marketing impedes the introduction of logistics as a concept of enterprise management, since they isolate the links of the logistics system, and, therefore, the individual stages of the logistics process from each other. Based on this, the problem arises of ensuring the continuity of logistics and technological processes at a minimum level of costs associated with the formation and management of various types of stocks in the logistics system. Transport stocks are created on all types of transport involved in the transportation of resources. In this regard, they are classified into reserves of railway, river, sea, road and air transport. The time spent by resources in transportation stocks includes the movement time of resources, which depends on the distance of transportation, type of transport, method of transportation; time for various shunting operations; loading and unloading operations when transferring cargo from one mode of transport to another. In market conditions, logistics systems and their constituent parts have to constantly adapt to the changing needs of customers. Based on this, the priorities of inventory management may change at one time or another. The inventory management model with a fixed order size can be applied if regular (daily) control of the inventory*

level in the warehouse is carried out and it is possible to order and receive resources at any time, and resource requirements can be established relatively accurately during the execution of the order.

**Keywords:** stock, order size, lead time.

**Вступ.** Від чіткої роботи локомотивного господарства залежить ефективна робота всієї інфраструктури залізниці. Отримуючи прибуток від надання послуг на перевезення, залізниця та її підрозділи мають компенсувати втрачені ресурси на підтримку і розвиток свого господарства [1].

Тому, коли господарювання є витратним, його ефективність погіршується за рахунок необґрунтованої кількості ресурсів, зокрема величини запасів сировини і запасних частин.

Клієнтів, що користуються транспортом, цікавить ціна, швидкість, комфорт при перевезенні, і залежно від їх співвідношень вони віддають перевагу відповідному транспорту.

Правильно організоване логістичне постачання дозволяє надати конкурентоспроможності відповідним видам транспорту для організації перевезень вантажів і пасажирів [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У ряді закордонних досліджень [3-5] розглянуто завдання, що виникають при визначенні економічного розміру замовлення і величини страхового запасу.

У нашій країні традиційно при розрахунках величини запасів виділялися технологічний і страховий запаси. Але якщо технологічний запас більш-менш легко обчислити при відомих витратах часу на ремонт і поставку на збирання при стабільній програмі ремонту, то страховий запас визначався приблизно в розмірі 5-80 % фронту ремонту агрегатів [6]. Математичні методи для практики не дозволяють повністю оцінювати розміри страхових запасів через різні обставини. Остаточний розмір запасів визначався техніко-економічними розрахунками [7, 8].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою статті є розгляд

питання залежності між економічним розміром замовлення і часом повторного замовлення на його поповнення, що, на відміну від інших методів, дозволяє визначити й управляти оптимальним розміром запасів.

**Основна частина дослідження.** Завдання, які виникають при визначенні економічного розміру замовлення і страхової надбавки, були досліджені декількома авторами, причому наявність зв'язку між цими двома величинами майже завжди залишалась непоміченою [9-11]. Розглянемо зв'язок між економічним розміром замовлення і точкою повторення замовлення та покажемо, що при заданих вихідних величинах існує єдиний економічний розмір замовлення і єдина точка повторення замовлення.

1. Постійні витрати в розрахунку на одне замовлення можна розрахувати, розділивши загальну суму адміністративних витрат, пов'язаних із закупівлями, на кількість замовлень. Відмінності у витратах на одне замовлення згладжуються і не мають суттєвого значення, якщо ці витрати однорідні. Інша можливість оцінювання суми постійних витрат на замовлення полягає в застосуванні хронометражу. Загальна сума постійних витрат на замовлення, імовірно, є нелінійною функцією від кількості розміщених замовлень.

2. Кількість закупаваних одиниць при кожному повторенні замовлення варіює навколо своєї середньої відповідно до закону Пуассона. У розглянутій задачі використання розподілу Пуассона обумовлено двома припущеннями. По-перше, імовірність попиту на товари, матеріали або взагалі запасені об'єкти даного найменування в кожен момент часу не повинна відрізнятися від імовірності попиту за тим самим найменуванням у



будь-який інший момент часу. По-друге, імовірність попиту даного найменування протягом решти дня не повинна залежати від кількості одиниць вже пред'явленого попиту за минулу частину того самого дня або за його годину, або за будь-який інший день чи годину.

3. При визначенні економічного розміру замовлення і страхового запасу депо намагається мінімізувати загальну суму залежних від його рішення витрат.

4. Витратами, що змінюються в залежності від розміру замовлення, є:

а) річна сума постійних витрат на замовлення;

б) поточні витрати на утримання запасів;

в) очікувані втрати в результаті дефіциту.

5. До витрат, змінних залежно від точки повторення замовлення, належать:

а) поточні витрати на утримання запасів, що складають страховий запас;

б) очікувані втрати в результаті дефіциту.

6. Втрати, що виникають у зв'язку з дефіцитом, у розрахунку на дефіцитну одиницю запасу постійні. Це припущення можна змінити, але такі зміни призводять до великого ускладнення розрахунків.

Застосовуються такі позначення вихідних даних:

Y – річна сума постійних витрат на запас;

I – поточні витрати на утримання запасів у відсотках їхньої вартості;

C – вартість одиниці товарів в умовних одиницях;

П – втрати від дефіциту в розрахунку на дефіцитну одиницю в умовних одиницях;

S – постійні витрати по замовленню в умовних одиницях.

Для невідомих задач використовуються такі позначення:

Q – економічний розмір замовлення в умовних одиницях;

k – точка повторення замовлення у фізичних одиницях.

Загальна сума змінних витрат за рік складається з постійних витрат на замовлення, поточних витрат на утримання запасів і очікуваних втрат у результаті дефіциту. Щорічні постійні утримання по замовленнях дорівнюють утриманням на одне замовлення, помноженим на кількість замовлень на рік  $Y/Q$ . Щорічні поточні витрати з утримання запасів можна подати як добуток відсотків поточних обчислень I на середню наявність запасів  $[Q/2 + (k+u)C]$  в умовних одиницях. У цьому виразі u – середня кількість одиниць, на які є попит на проміжку відставання поставки від моменту замовлення. Таким чином, k-u являє собою середню кількість одиниць у страховому запасі, а (k-u)C – вартість цієї кількості. Очікувані втрати в результаті дефіциту дорівнюють добутку трьох величин: а) втрат, що виникають при дефіциті в розрахунку на дефіцитну одиницю; б) середньої кількості дефіцитних одиниць за один період поповнення запасів; в) кількості періодів поповнення запасів на рік. Кількість дефіцитних одиниць у розрахунку на один період поповнення виражається такою формулою:

$$\sum_{m=k+1}^{\infty} (m-k) \frac{e^{-u} u^m}{m!},$$

де m – фактична кількість одиниць, необхідних протягом періоду відставання поставки від моменту замовлення;

u – середня кількість одиниць, необхідних протягом періоду відставання поставки від моменту замовлення;

k – точка повторення замовлення.

Наведене вище рівняння можна спростити для обчислення:

$$\sum_{m=k+1}^{\infty} (m-k) \frac{e^{-u} u^m}{m!} = \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{m e^{-u} u^m}{m!} - k \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!} = u \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^{m-1}}{(m-1)!} - k \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!}$$

Поклавши  $p=m-1$ ,

$$\sum_{m=k+1}^{\infty} (m-k) \frac{e^{-u} u^m}{m!} = u \sum_{p=k}^{\infty} \frac{e^{-u} u^p}{p!} - k \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!}$$

Оскільки різниця між  $m$  і  $p$  має формальне значення, то

$$\sum_{m=k+1}^{\infty} (m-k) \frac{e^{-u} u^m}{m!} = u \sum_{m=k}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!} - k \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!} = u \frac{e^{-u} u^k}{k!} + (u-k) \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!}.$$

Останній вираз веде до простих обчислень, оскільки значення  $\frac{e^{-u} u^k}{k!}$  і  $\sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!}$  можна отримати з таблиць.

Вираз для загальної суми змінних витрат (TVC) можна отримати, підсумовуючи три доданки:

$$TVC = S \frac{Y}{Q} + 1 \left[ \frac{Q}{2} + (k-u)C \right] + \Pi \frac{Y}{Q} \left[ \frac{ue^{-u} u^k}{k!} + (u-k) \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!} \right].$$

Прирівнявши частинну похідну і кінцевий приріст відповідно по  $Q$  і  $k$  до

нуля і розв'язавши отримане рівняння з  $Q$ , отримаємо:

$$\frac{\partial TVC}{\partial Q} = -\frac{SY}{Q^2} + \frac{1}{2} \frac{\Pi Y}{Q^2} \left[ \frac{ue^{-u} u^k}{k!} + (u-k) \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!} \right] = 0$$

$$Q_1 = \sqrt{\frac{2YS + 2\Pi Y \left[ \frac{ue^{-u} u^k}{k!} + (u+k) \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!} \right]}{I}}$$

$$\frac{\Delta TVC}{\Delta k} = IC + \Pi \frac{Y}{Q} \left[ \frac{ue^{-u} u^{k+1}}{(k+1)!} + (u-k-1) \sum_{m=k+2}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!} - \frac{ue^{-u} u^k}{k!} - (u-k) \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!} \right] = 0$$

Цей вираз можна спростити:

$$IC + \Pi \frac{Y}{Q} \left[ - \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!} \right] = 0;$$

$$Q_2 = \frac{\Pi Y}{IC} \sum_{m=k+1}^{\infty} \frac{e^{-u} u^m}{m!}.$$

Після підстановки вихідних даних при деяких значеннях  $k$  обидва вирази для  $Q$  набудуть одних і тих самих значень. Ці значення для  $Q$  і  $k$  є розв'язками спільних рівнянь. На практиці часто невідлення окремих екземплярів виключає можливість точного розв'язання. Тому правильно

встановлена точка повторення замовлення повинна відповідати такому значенню  $k$ , яке зближує знайдені значення  $Q$  тісніше, ніж будь-яке інше значення.

Для реалізації розв'язання цієї задачі можна використати алгоритм, структурна схема якого наведена на рисунку.

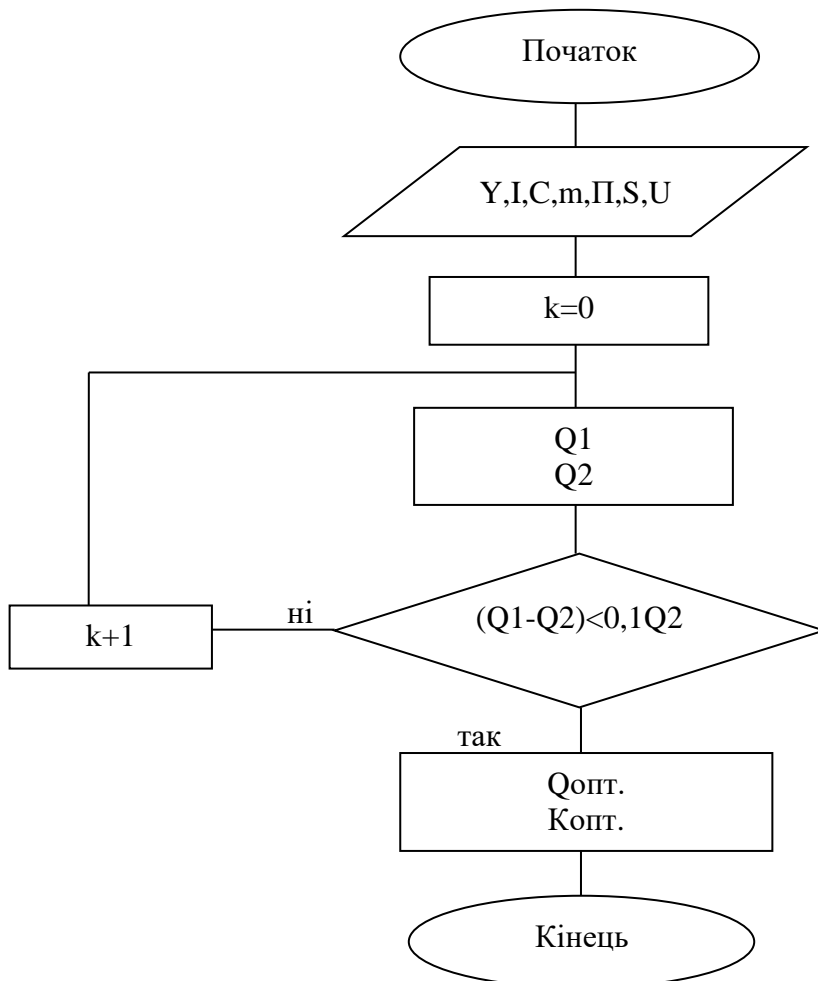


Рис. Структурна схема алгоритму визначення  $Q$  і  $k$

**Висновки.** Таким чином, показана точна форма взаємодії між економічним розміром замовлення і точкою повторення замовлення. Цей взаємозв'язок майже повністю ігнорувався в літературі з питань

регулювання запасів, яка розглядала ці величини як взаємозалежні. Помилки такого роду були найчастіше причиною відхилення теоретичних висновків від реальності.

### Список використаних джерел

1. Гаджинский А. М. Основы логистики. Москва: ИВЦ «Маркетинг», 1995. 214 с.
2. Бирман И. Я., Пугачев В. Ф., Волконский В. А. Оптимальный план отрасли. Москва: Экономика, 1970. 431 с.

3. Forster M. Review of The Use of GIS in the Marketing and Planning of Logistics Services. *Logistics Research Paper*. 2000. 128 p.
4. Speranza M. Trends in transportation and logistics. *European Journal of Operational Research*. 2018. 836 p.
5. Lomotko D., Alyoshinsky E., Zambrybor G. Methodological Aspect of the Logistics Technologies Formation in Reforming Processes on the Railways. *Transportation Research Procedia*. 2016. 131 p.
6. Паламарчук М. В., Крашенінін О. С., Кривошея Ю. В. Моделювання парку ТРС на перехідний період поступової його зміни. *Зб. наук. праць ДонІЗТ*. Донецьк: ДонІЗТ, 2009. С. 61-67.
7. Сытник В. Ф., Карагодова Е. А. Математические модели в планировании и управлении предприятием. Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1985. 214 с.
8. Петраков Н. Я. Экономико-математические исследования затрат и результатов. Москва: Наука, 1976. 270 с.
9. Крашенінін О. С., Фалендиш А. П., Шапатіна О. О., Одегов М. М. Концепція розвитку і реструктуризації локомотивного депо. *Зб. наук. праць ДонІЗТ*. Донецьк: ДонІЗТ, 2011. С. 133-136.
10. Крашенінін О. С., Гринів Ю. В., Максимов М. В. Методика оцінки терміну виробництва нового ТРС для заміни експлуатованого ТРС, ресурс якого наблизився до граничного. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2012. С. 247-250.
11. Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. Москва: Машиностроение, 1969. 324 с.

---

Крашенінін Олександр Семенович, д-р техн. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-99.

E-mail: Alsem1512@gmail.com.

Сулежко Дмитро Едуардович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (095) 414-31-91. E-mail: dmitriys1113@gmail.com.

Кузьмін Єгор Юрійович, магістрант, група 1-6-Лм Українського державного університету залізничного транспорту.

Krashenin Oлександр, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-99. E-mail: Alsem1512@gmail.com.

Sulezhko Dmytro, Postgraduate Student, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (095) 414-11-71. E-mail: dmitriys1113@gmail.com.

Kuzmin Egor, master, Group 1-6-Lm, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 03.09.2019 р.

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

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

*Випуск 186*

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 21.12.2015 р. № 1328 (додаток 8)).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.  
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

Редактори Ібрагімова Н. В., Третьякова К. А.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 26.09.2019 р.  
Формат паперу А4. Папір писальний.  
Умовн. друк. арк. 7,75. Тираж 63. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018р.