



**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 182*

**Харків 2018**

## **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 № 10 від 26 грудня 2018 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

#### 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)  
Bureika G., dsc, professor (VG TU, Литва)  
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

#### 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)

#### Будівництво та цивільна інженерія (192)

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

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

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)  
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)  
Онопрійчук 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)

#### 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

### Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Мозговий А. О.* Імовірнісна оцінка надійності голів шлюзів за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду 6
- Рунова Р. Ф., Гоц В. І., Руденко І. І., Петропавловський О. М., Константиновський О. П., Ластівка О. В.* Ефективність пластифікуючих поверхнево-активних речовин у розчинах і бетонах на основі лужних цементів 18
- Борзяк О. С., Дудін О. А., Куценко М. Ю., Познякова В. Г.* Розроблення заходів з захисту штучних споруд залізничного транспорту від електрокорозії під дією змінного струму витoku і високовольтної напруги 28
- Демідов Д. В.* Вивчення впливу мінеральних наповнювачів на вогнезахисні характеристики водно-дисперсійних лакофарбових покриттів 37
- Плугін А. А., Мірошніченко С. В., Зверева А. С., Резніченко І. В.* Деформативні властивості ґрунтополімерного композита: методика експериментальних досліджень 44

### Транспортні технології (275)

- Ахраменко Г. В., Дубровская Т. А.* Особенности повышение скоростей движения поездов на железнодорожных линиях межрегионального сообщения 53
- Каменев О. Ю., Лапко А. О., Щебликіна О. В., Лазарев О. В., Ушаков М. В.* Модель диспетчерського керування взаємозалежними транспортними потоками на промисловому залізничному транспорті 63

### Залізничний транспорт (273)

- Мямлін С. В., Скалозуб В. В., Мурадян Л. А.* Адаптивні Байєсівські моделі оцінювання показників надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу 80

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)**

---

УДК 626/627

**ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ГОЛІВ ШЛЮЗІВ ЗА КРИТЕРІЄМ  
СТІЙКОСТІ ПРОТИ ЗСУВУ НА ПРИКЛАДІ ГІДРОВУЗЛІВ ДНІПРОВСЬКОГО  
КАСКАДУ**

Канд. техн. наук А. О. Мозговий

**ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГОЛОВ ШЛЮЗОВ ПО КРИТЕРИЮ  
УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ СДВИГА НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ  
ДНЕПРОВСКОГО КАСКАДА**

Канд. техн. наук А. А. Мозговой

**PROBABILISTIC RELIABILITY ASSESSMENT OF GATEWAY HEADS BY THE  
CRITERIA OF STABILITY AGAINST DISPLACEMENT ON THE EXAMPLE OF  
HYDRO SCHEMES OF THE DNIEPER CASCADE**

PhD (Tech.) A. O. Mozgovyy

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.182.2018.159543>

---

*Отримав подальший розвиток метод оцінювання надійності голів шлюзів за критерієм втрати стійкості проти зсуву. Під час виконання дослідження ураховано випадковий характер впливів і зовнішніх навантажень, під дію яких потрапляють голови шлюзів, а також кореляційні залежності між ними. Крім того, ураховано випадковий характер механічних властивостей ґрунту основи і кореляційні залежності між ними. Проведено чисельну імовірнісну оцінку ризику досягнення граничного стану голів шлюзів на скельовій і нескельовій основах гідровузлів Дніпровського каскаду. Метод може застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності каскадів гідровузлів.*

**Ключові слова:** голова шлюзу, природні фактори, кореляція, імовірнісна оцінка надійності, каскад гідровузлів.

*Получил дальнейшее развитие метод оценки надежности голов шлюзов по критерию потери устойчивости против сдвига. При выполнении исследования учтен случайный характер воздействий и внешних нагрузок, действие которых в процессе эксплуатации воспринимают головы шлюзов, а также корреляционные зависимости между ними. Кроме того, учтен случайный характер механических свойств грунтов основания и корреляционные зависимости между ними. Проведена численная вероятностная оценка риска достижения предельного состояния голов шлюзов на скальном и нескальном основаниях гидроузлов Днепровского каскада. Метод может использоваться при вероятностных расчетах надежности каскадов гидроузлов.*

**Ключевые слова:** голова шлюза, природные факторы, корреляция, вероятностная оценка надежности, каскад гидроузлов.

*When calculating and designing modern hydraulic structures, it becomes necessary to assess their reliability and safety based on probabilistic methods. This work further develops the method*

for assessing reliability of gateway heads by the criteria of stability loss against displacement and overturning.

The work considers the random nature of the external loads and impacts, which the gateway heads bear during operation, as well as correlations between them. It also considers the random nature of mechanical properties of the foundation soils and correlations between them. The suggested method allows assessing reliability by the criterion of stability loss against displacement of the gateway heads located both on rock and non-rock foundations. For solving this problem, the method of statistical tests (Monte Carlo method) was applied, which is widely used for assessing probabilistic reliability of complex technical systems.

A numerical probabilistic assessment of the risk when the gateway heads on rock and non-rock foundations at hydro schemes of the Dnieper Cascade reach the boundary conditions has been performed. Confidence limits of the probability of losing stability of the gateway heads against displacement are determined; a number of statistical tests required to achieve confident accuracy is determined.

Correctness of the obtained results is confirmed by their correspondence with the reliability assessment of the gateway heads of the Dnieper cascade by deterministic analyses using the method of boundary conditions.

In the future, the proposed method could be used in probabilistic reliability analyses of hydraulic structures and cascades of hydro schemes, taking into account the correlations between natural factors: hydrological characteristics, wind, and ice, as well as temperature loads and impacts.

**Keywords:** gateway head, natural factors, correlation, probabilistic reliability assessment, cascade of hydro schemes.

**Вступ.** Розрахунок і проектування сучасних гідротехнічних споруд потребують оцінювання їхньої безпеки і надійності на основі імовірнісних методів [1–2]. Судноплавні шлюзи належать до найбільш поширених спеціальних типів споруд гідровузлів комплексного призначення як в Україні, так і у світі. Функціональним призначенням шлюзів є пропускання суден через створ гідровузла. Основними конструктивними елементами шлюзів є голови, камери і ворота.

Дана робота спрямована на оцінювання надійності голів шлюзів на скельовій і нескельовій основах, які входять до складу споруд водопідпільного фронту на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. Надійність судноплавних шлюзів впливає на надійність гідровузла і каскаду гідровузлів у цілому.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підходи щодо імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд з урахуванням мінливості

природно-кліматичних впливів, гідрологічних, сейсмічних впливів, а також недопущення виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах і гідровузлах наведено в закордонних роботах [3–11]. Зазначені джерела регламентують урахування кореляційного зв'язку, який існує між природними факторами під час визначення надійності гідротехнічних споруд.

Питання імовірнісної оцінки експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів, розроблення критеріїв їхньої надійності, статистичні методи аналізу їхнього стану з урахуванням мінливості природних факторів, прогнозування аварійності гідротехнічних споруд, статистичне опрацювання природно-кліматичних впливів на території України, дослідження ризику досягнення граничного стану на основі імовірнісних методів гідротехнічних споруд Дніпровського каскаду розглянуто в роботах [12–27].

Не вирішеною раніше частиною проблеми є те, що існуючі методи оцінювання надійності гідротехнічних споруд, зокрема голів шлюзів на скельовій і нескельовій основах, не ураховують певні кореляційні залежності [24], які існують між природними факторами, що є визначальними при оцінюванні надійності каскадів гідровузлів [25–26, 28–29].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Завданням роботи є розроблення алгоритму імовірнісної оцінки надійності голів судноплавних шлюзів на скельовій і нескельовій основах з урахуванням кореляційних залежностей, які існують між природними факторами, а саме кореляційні залежності між гідрологічними характеристиками водотоку, температурою і амплітудою коливань температур зовнішнього повітря, кореляційні залежності між характеристиками ґрунту основи. Метою роботи є апробація запропонованого алгоритму на головах шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду з отриманням чисельного значення імовірності виникнення аварії на зазначених гідротехнічних спорудах.

**Основна частина дослідження.** Нижче наведено характеристики голів шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду.

*Голови шлюзів Київського і Канівського гідровузлів.* Верхні і нижні голови шлюзів докової конструкції з нерозрізним днищем. Голови шлюзів розташовані у верхніх б'єфах в обсіпках. Ширина голів 38 м, 44 м, висота голів 24 м, 35 м (див. рис. 1–2). Ґрунти – нескельові. Клас наслідків споруд – СС2-1.

*Голови шлюзу Кременчуцького гідровузла.* Верхня і нижня голови шлюзу розташовані у верхньому б'єфі, обсіпані ґрунтом і спряжені з будівлею гідроелектростанції за допомогою земляної вставки. Ширина голів 44 м, 52.4 м. Голови шлюзу врізані у скельний масив на глибину до 30 м. Клас наслідків споруд гідровузла – СС3.

*Голови шлюзу Середньодніпровського (колишнього Дніпродзержинського) гідро-*

*узла.* Верхня і нижня голови шлюзу розташовані у верхньому б'єфі з підводною частковою обсіпкою. Верхня голова – з нерозрізним залізобетонним днищем. Нижня голова – зі стоянів із розрізним армобетонним днищем. Ширина голів 36 м, 50 м, висота голів ~28 м. Клас наслідків споруд гідровузла – СС2-1.

*Голови трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла.* Верхня (перша) голова шлюзу примикає до глухих прогонів водозливної греблі. Верхня (перша) і нижня (четверта) голови шлюзу врізані в скельну основу на глибину до 20 м. Ширина голів ~40 м (див. рис. 3–4). Клас наслідків споруд – СС3.

*Голови однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла.* Верхня і нижня голови шлюзу врізані в скельну основу на глибину до 54 м. Ширина голів 43 м, 52 м. В основі залягають слаботрищівуваті граніти. Клас наслідків споруд гідровузла – СС3.

*Голови шлюзу Каховського гідровузла.* Верхня і нижня голови шлюзу розташовані у верхньому б'єфі між будівлею ГЕС і лівим берегом. Верхня голова – нерозрізна конструкція з розмірами у плані 43.0×30.0 м. Товщина днища 9.5 м. Висота підземної частини 32 м. Голова обладнана плоскими робочими і аварійно-ремонтними затворами. Нижня голова має розмір у плані 98.5×35.64 м (із стоянами). Товщина днища 10.0 м. Голова обладнана двостворчатими робочими і ремонтними затворами. Верхня голова з боку водосховища і рейду обсіпана земляними дамбами з шириною майданчиків по верху 30 м. Клас наслідків споруд гідровузла – СС3.

У попередніх роботах [28-29] досліджено імовірнісну надійність залізобетонних конструкцій стін камер шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати міцності, стійкості проти зсуву і спливання за детерміністичною методикою за методом граничних станів, які засвідчили, що вказані споруди за критеріями втрати міцності і спливання мають значний запас



надійності, тому в даному дослідженні за критерій настання граничного стану голів шлюзів прийнято критерій стійкості проти зсуву. Конструктивні особливості голів

трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла потребують перевірки надійності голів шлюзу за критерієм стійкості проти перекидання.

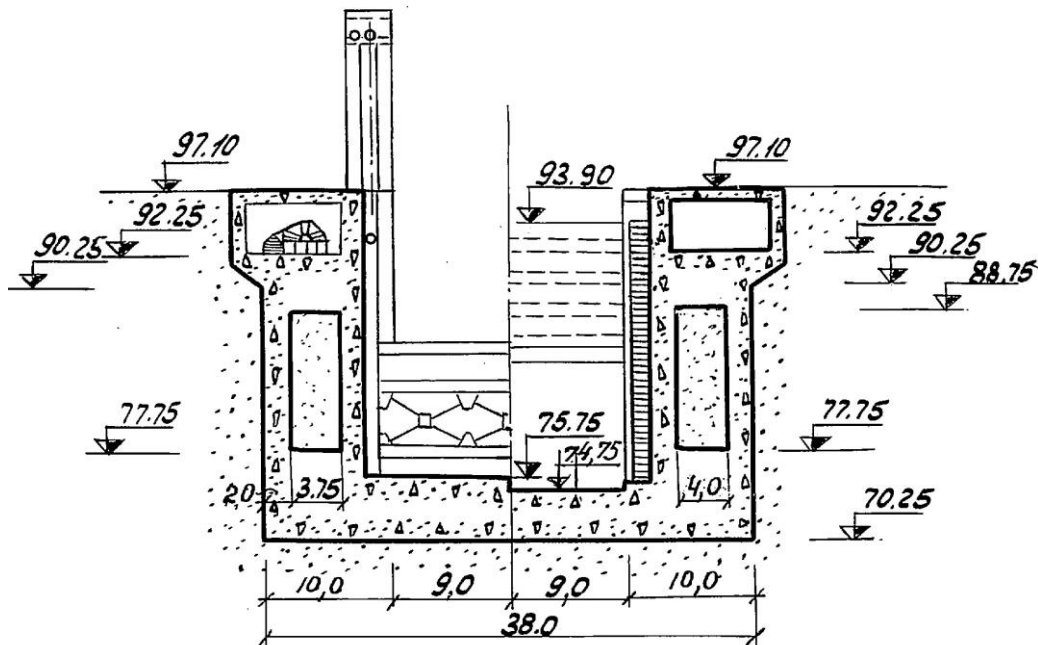


Рис. 1. Верхня голова шлюзу Канівського гідровузла (розміри в метрах)

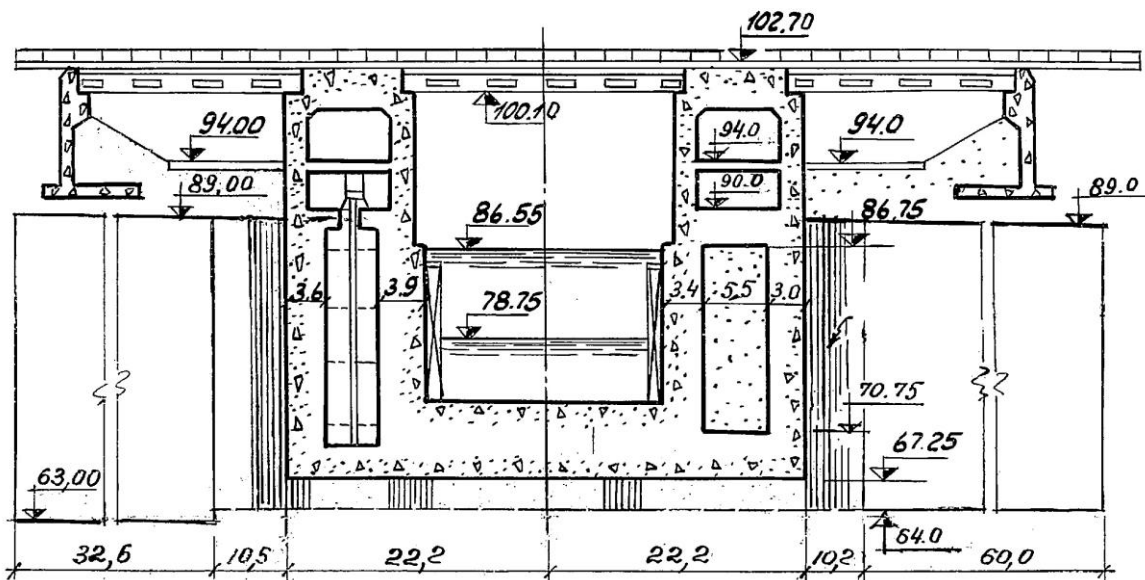


Рис. 2. Нижня голова шлюзу Канівського гідровузла (розміри в метрах)

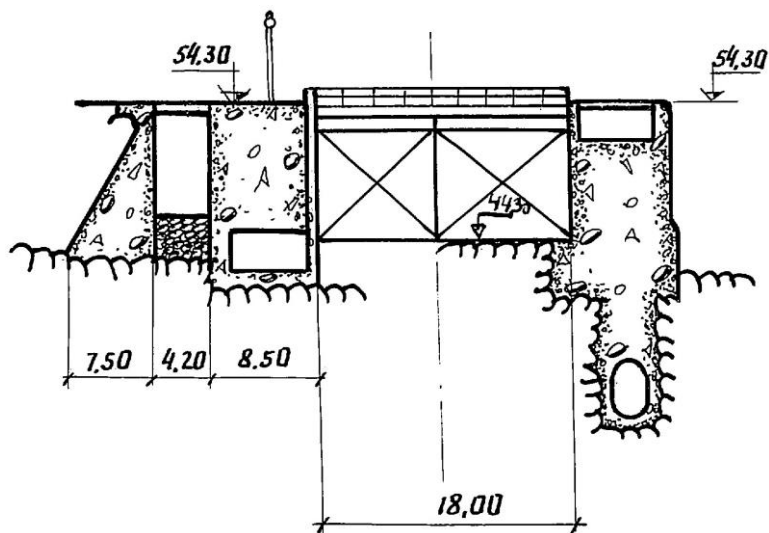


Рис. 3. Перша голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла (розміри в метрах)

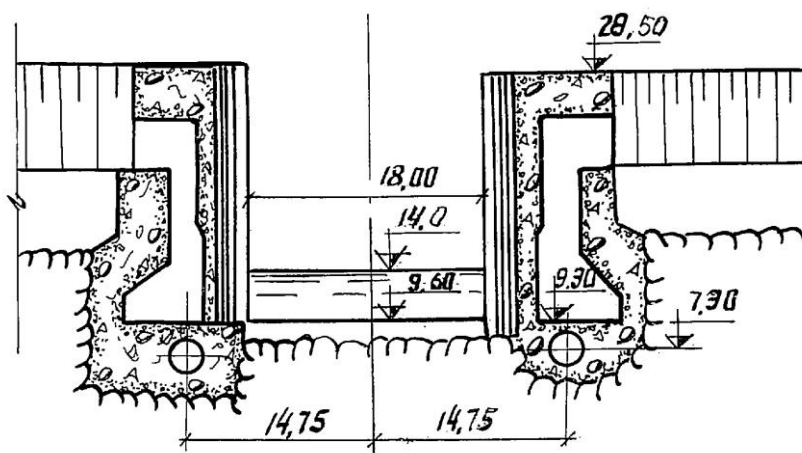


Рис. 4. Четверта голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла (розміри в метрах)

*Перевірка надійності голів шлюзів за критеріями стійкості проти зсуву і перекидання*

Розрахунки за детерміністичною методикою виконуються для основного і особливого сполучення навантажень згідно з умовою [1]

$$\gamma_n \times \gamma_{lc} \times F \leq \gamma_c \times R, \quad (1)$$

де  $F$  – розрахункове значення узагальненого силового впливу з урахуванням коефіцієнта надійності за навантаженням  $\gamma_f$ ;

$R$  – узагальнена несуча здатність споруди чи основи;

$\gamma_{lc}$  – коефіцієнт сполучення навантажень, приймається для основного сполучення навантажень  $\gamma_{lc}=1.0$ ; для особливого –  $\gamma_{lc}=0.9$ ;

$\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи, приймається  $\gamma_c=1.1$ ;

$\gamma_n$  – коефіцієнт надійності, приймається  $\gamma_n=1.25$  для споруд класу наслідків СС3,  $\gamma_n=1.2$  для споруд класу наслідків СС2-1.

При виконанні розрахунків розглядаються такі навантаження і впливи: власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання; силовий вплив води з боку верхнього і нижнього б'єфів; гідростатичний тиск води з боку обернених засипок; гідростатичний тиск води з боку камери шлюзу; силовий вплив води, що фільтрується; температурні впливи; вага постійного технологічного обладнання, підйомних, транспортних пристроїв; власна вага і тиск ґрунту обернених засипок; сейсмічні впливи.

Для оцінювання ризику втрати стійкості проти зсуву і перекидання за методом граничних станів формулу (1) доцільно подати як

$$k = \frac{R}{F} \geq k_n = \frac{\gamma_n \times \gamma_c}{\gamma_{lc}}, \quad (2)$$

де  $k$  – розрахункове значення коефіцієнта запасу стійкості (проти зсуву чи перекидання);

$k_n$  – нормативне значення коефіцієнта запасу стійкості.

Отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: голови шлюзів Кременчуцького, Дніпровського, Каховського гідровузлів: для основного сполучення навантажень (осн. с. н.)  $k_n = 1.14$ ; для особливого сполучення навантажень (особ. с. н.)  $k_n = 1.02$ ; голови шлюзів Київського, Канівського, Середньодніпровського гідровузлів: для осн. с. н.  $k_n = 1.09$ ; для особ. с. н.  $k_n = 0.98$ .

За детерміністичною методикою на основі методу граничних станів отримано такі значення розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості проти зсуву  $k_c$  і стійкості проти перекидання  $k_{пер}$  при різних розрахункових випадках:

– верхня голова шлюзу Київського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.64$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.53$ ; нижня голова шлюзу Київського гідровузла: для осн. с. н.

$k_c = 1.41$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.27$ ; верхня голова шлюзу Канівського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.47$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.34$ ; нижня голова шлюзу Канівського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.36$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.25$ ; верхня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.63$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.50$ ; нижня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.89$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.72$ ; верхня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.59$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.45$ ; нижня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.92$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.83$ ; перша (верхня) голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.64$ ,  $k_{пер} = 2.02$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.55$ ,  $k_{пер} = 1.93$ ; четверта (нижня) голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.27$ ,  $k_{пер} = 2.34$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.14$ ,  $k_{пер} = 2.26$ ; верхня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.12$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.03$ ; нижня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.48$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.38$ ; верхня голова шлюзу Каховського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.46$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.36$ ; нижня голова шлюзу Каховського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.57$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.47$ .

*Імовірнісний метод визначення ризику втрати стійкості проти зсуву і перекидання голів шлюзів*

Розв'язання передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їхніх імовірнісних характеристик, а також визначення імовірності втрати стійкості проти зсуву і перекидання голови шлюзу.

Зазначені вище критерії настання граничного стану є статистично залежними, тому що їх виникнення обумовлене позначками рівнів води у верхньому б'єфі.

При розгляданні схеми плоского поступального зсуву по горизонтальній поверхні рівняння зв'язку має вигляд

$$k_c = \frac{(V-W) \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \cdot A_n}{F}, \quad (3)$$

де  $k_c$  – коефіцієнт стійкості проти зсуву;

$V$  – підсумок вертикальних сил, спрямованих униз;

$W$  – підсумок вертикальних сил, спрямованих догори;

$\operatorname{tg} \varphi$  – коефіцієнт внутрішнього тертя;

$c$  – питоме зчеплення;

$A_n$  – площа підошви споруди;

$F$  – узагальнена сила зсуву.

У випадку нескельової основи доданком  $c \cdot A_n$  у формулі (3) можна знехтувати.

При розрахунку на перекидання використовується рівняння зв'язку

$$k_{nep} = \frac{M_{ym}}{M_{nep}}, \quad (4)$$

де  $k_{nep}$  – коефіцієнт стійкості проти перекидання;

$M_{ym}$  – момент утримуючих сил;

$M_{nep}$  – момент сил, що перекидають.

Вхідними детерміністичними параметрами прийнято площу основи голови шлюзу  $A_n$ , м<sup>2</sup>, інші геометричні розміри, вагу допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma b} = 0.02$ ; щільність ґрунту оберненої засипки за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma gr} = 0.06$ .

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ$  позначки рівня води  $Z$ , м, перед головою шлюзу. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між паводковими витратами по гідровузлах Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено в роботах [24, 30].

За значенням  $pZ$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z$ , м, перед головою шлюзу. Між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів каскаду згідно з роботою [24] існує функціональна залежність. Тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності  $pZ$  для шлюзів кожного гідровузла каскаду задається однаковою. Задається залежність між рівнями верхнього  $Z_i$ , м, і нижнього б'єсів  $Z_{НБ}$ , м.

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності зважуючого протитиску в основі голови шлюзу  $pW_f$ . За значенням імовірності визначається квантиль – величина сили вертикального протитиску  $W_f$ .

За значеннями рівнів верхнього  $Z_i$ , м, і нижнього б'єсів  $Z_{НБ}$ , м, визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку оберненої засипки.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність щільності ґрунту оберненої засипки  $p\rho_{gr}$ , за якою визначається квантиль – значення щільності ґрунту  $\rho_{gr}$ . Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя  $p\operatorname{tg} \varphi_g$ , за якою визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя  $\operatorname{tg} \varphi_g$ . За значеннями  $\rho_g$  і  $\operatorname{tg} \varphi_g$  визначається сила бічного тиску ґрунту оберненої засипки.

За імовірнісними залежностями щорічних максимально низьких середньомісячних температур за нормальним розподілом, а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур зовнішнього повітря за нормальним розподілом у місцях розташування гідровузлів визначається реактивний тиск ґрунту оберненої засипки [31].

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності зважуючого протитиску в основі голови шлюзу  $pW_f$ . За значенням імовірності визначається квантиль – величина сили вертикального протитиску  $W_f$ .

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності Карпат, Вранча, Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані про їхню сейсмічну активність опрацьовано в роботі [32]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно з роботою [33].

Під час виконання одного статистичного випробовування, враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів, задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів  $pJ_r$ , розподілені від 0 до 1 у Карпатах, районі Вранча і Криму. За значенням  $pJ_r$  визначаються квантилі – бальність землетрусів  $J_r$ , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування шлюзу [34]. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $J_r$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за призначений строк служби. Сейсмічний вплив задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродинамічний тиск води в обернених засипках, сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження відповідно до роботи [35] визначено лінійно-спектральним методом. Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН, від розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках  $g$ ) голови

шлюзу. Визначається сейсмічний гідродинамічний тиск води. Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродинамічної сили тиску води  $E_{psg}$ , кН, від розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках  $g$ ) голови шлюзу.

Визначаються рівнодійні вертикальних сил  $V$  і  $W$  і горизонтальних сил  $F$ , що діють на голову шлюзу. При цьому ураховуються як випадкові, так і детерміністичні навантаження.

Характеристики ґрунту основи задані випадковими величинами [36–37]. Коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питоме зчеплення  $c$  задані за нормальним законом як випадкові корельовані величини. Такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c}$ . Визначається кореляційний момент  $K_{tg\varphi c}$ . Коефіцієнт варіації прийнято  $C_v = 0.122$ . Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу з наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$ . Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$ . За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із використанням умовного закону розподілу, визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ .

Розглядається схема плоского поступального зсуву по горизонтальній або похилій поверхні. Обчислюється значення коефіцієнта стійкості проти зсуву і перекидання за формулами (3, 4). При кожному випробовуванні голова шлюзу вважається ненадійною при досягненні хоча б одного граничного стану. Розрахунок виконується методом статистичних випробовувань  $N$  разів. Кількість випробовувань, при яких  $k < 1$ , віднесена до загальної кількості

випробовувань  $N$  і визначає величину ризику настання граничного стану голови шлюзу за весь строк служби.

Значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану голови шлюзу обчислюється за формулою

$$p = 1 - (1 - pr)^T, \quad (5)$$

де  $p$  – щорічна імовірність настання граничного стану;

$pr$  – імовірність настання граничного стану за призначений строк служби;

$T$  – призначений строк служби, роки,

і виконується порівняння з допустимою величиною.

Результати розрахунків ризику виникнення аварій голів шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду наведені в таблиці.

Таблиця

Результати оцінки імовірності втрати стійкості і перекидання голів шлюзів

Клас споруди	Кількість статистичних випробувань	Розрахункове значення імовірності настання граничного стану за призначений строк служби $T$ , $p$ .	Розрахункове значення щорічної імовірності настання граничного стану, $p^{-1}$	Допустиме значення імовірності настання граничного стану, $p^{-1}$
Верхня/нижня голова шлюзу Київського гідровузла				
СС2-1	$3.62 \times 10^5$	$4.22 \times 10^{-3}$	$8.47 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4}$
	$2.43 \times 10^5$	$6.36 \times 10^{-3}$	$1.28 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
Верхня/нижня голова шлюзу Канівського гідровузла				
СС2-1	$2.71 \times 10^5$	$5.64 \times 10^{-3}$	$1.13 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
	$1.60 \times 10^5$	$9.37 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
Верхня/нижня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла				
СС3	$8.12 \times 10^7$	$1.91 \times 10^{-5}$	$1.91 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-5}$
	$2.23 \times 10^8$	$7.0 \times 10^{-6}$	$7.0 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-5}$
Верхня/нижня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла				
СС2-1	$1.54 \times 10^8$	$1.02 \times 10^{-5}$	$2.01 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-4}$
	$5.11 \times 10^8$	$3.05 \times 10^{-6}$	$6.03 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-4}$
Верхня/нижня голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла				
СС3	$8.34 \times 10^6$	$1.85 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
	$1.63 \times 10^7$	$9.72 \times 10^{-5}$	$9.72 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-5}$
Верхня/нижня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла				
СС3	$1.55 \times 10^9$	$1.10 \times 10^{-6}$	$1.10 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-5}$
	$2.82 \times 10^6$	$5.53 \times 10^{-4}$	$5.53 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Верхня/нижня голова шлюзу Каховського гідровузла				
СС3	$2.03 \times 10^6$	$7.73 \times 10^{-4}$	$7.73 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
	$6.51 \times 10^6$	$2.38 \times 10^{-4}$	$2.38 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться в межах довірчого інтервалу [38]. Результати розрахунків ризику виникнення аварій голів шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду свідчать, що розрахункові значення щорічної імовірності настання граничного стану голів шлюзів не перевищують допустимих значень, тому їхня надійність за імовірнісною методикою забезпечена.

**Висновки.** Удосконалено методику оцінювання надійності голів шлюзів на

скельовій і нескельовій основах за критеріями втрати стійкості проти зсуву і перекидання. Ураховано імовірнісний характер навантажень і впливів, механічних властивостей ґрунту основи, кореляційні залежності між природними факторами. Методика апробована на прикладі голів шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду і може застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів.

### Список використаних джерел

1. Гідротехнічні споруди. Основні положення: ДБН В.2.4-3:2010. – [Чинний від 2011-01-01]. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2010. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
2. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009. – [Чинний від 2009-12-01]. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2009. – 30 с. – (Державні будівельні норми України).
3. Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management [Text] / FEMA P-1025 : Catalog №14353-1. – Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2015. – 49 p.
4. Engineering guidelines for the evaluation of hydropower [Text] : Chapter 1. – Washington : FERC. – 2016. – 77 p. – (Federal energy regulatory commission, Division of dam safety and inspections).
5. Probabilistic Seismic Hazard Analysis [Text] : Chapter R20. – Washington : DRAFT. – 2014. – 84 p. – (Engineering guidelines).
6. Arbeitshilfe zur DIN 19700 für hochwasserrückhaltebecken [Text] / Landesanstalt für umwelt, messungen und naturschutz. – Baden-Württemberg : JVA Mannheim @ Druckerei. – 2007. – 143 p. – (Fließgewässer, Integrierter Gewässerschutz).
7. Guide to interpretive documents for essential requirements, to EN 1990 and to application and use of Eurocodes [Text]: Handbook 1. – UK Watford : Garston, 2004. – 155 p. – (Basis of structural design).
8. Guide to the basis of structural reliability and risk engineering related to Eurocodes, supplemented by practical examples 1990 and to application and use of Eurocodes [Text]: Handbook 2. – Prague, 2005. – 254 p. – (Reliability backgrounds).
9. Probabilistic model code. Part 1 – Basis of design. JCSS working materials: [Електронний ресурс] // JCSS. – 2000. – 62 p. – Режим доступу : <http://www.jcss.ethz.ch>.
10. Design regulations of Swedish board of housing, building and planning [Text] / Swedish Board of housing, building and planning. – Sweden, Karlskrona: Boverket, 2000. – 187 p. – (Mandatory provisions and general recommendations). ISBN: 91-7147-616-4, ISSN: 1100 0856.
11. Westberg, M. Sannolikhetsbaserad bedömning av betongdammars stabilitet. Bakgrundsbeskrivning till framtagande av "Probabilistic model code for concrete dams" [Text] / M. Westberg, F. Johansson. – Sweden: Energiforsk, 2016. – 50 p. ISBN 978-91-7673-291-5.
12. Altarejos-García, L. Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis [Text] / L. Altarejos-García, I. Escuder-Bueno, A. Serrano-Lombillo [and others] // Structural Safety. – 2012. – Vol. 36-37. – P. 1-13.
13. Gaspar, A. Methodology for a probabilistic analysis of an RCC gravity dam construction. Modelling of temperature, hydration degree and ageing degree fields [Text] / A. Gaspar, F. Lopez-

Caballero, A. Modaresi-Farahmand-Razavi [and others] // *Engineering Structures*. – 2014. – Vol. 65. – P. 99–110.

14. Lupoi, Alessio. A probabilistic method for the seismic assessment of existing concrete gravity dams [Text] / Alessio Lupoi, Carlo Callari // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2012. – Vol. 8. – Issue 10. – P. 985–998.

15. Morales-Nápoles, O. A continuous Bayesian network for earth dams' risk assessment: methodology and quantification [Text] / O. Morales-Nápoles, D.J. Delgado-Hernández, D. De-León-Escobedo [and others] // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2014. – Vol. 10. – Issue 5. – P. 589–603.

16. Arunraj, N.S. Modeling uncertainty in risk assessment: An integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation [Text] / N.S. Arunraj, S. Mandal, J. Maiti // *Accident Analysis & Prevention*. – 2013. – Vol. 55. – P. 242–255.

17. Su, H. Z. Optimization of reinforcement strategies for dangerous dams considering time-average system failure probability and benefit–cost ratio using a life quality index [Text] / H. Z. Su, J. Hu, Z. P. Wen // *Natural hazards*. – 2013. – Vol. 65. – Issue 1. – P. 799–817.

18. Peyras, L. Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis and reliability methods–application to hazards studies [Text] / L. Peyras, C. Carvajal, H. Felix [and others] // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2012. – Vol. 16. – Issue 7. – P. 795–817.

19. Wu, Z.Y. A reliability-based approach to evaluating the stability of high rockfill dams using a nonlinear shear strength criterion [Text] / Z. Y. Wu, Y. L. Li, J. K. Chen [and others] // *Computers and Geotechnics*. – 2013. – Vol. 51. – P. 42–49.

20. Li, Y. Penalty function-based method for obtaining a reliability indicator of gravity dam stability [Text] / Y. Li, Y. Sun, B. Li [and others] // *Computers and Geotechnics*. – 2016. – Vol. 81. – P. 19–25.

21. Cho, S. E. Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation [Text] / S. E. Cho // *Engineering Geology*. – 2012. – Vol. 133–134(0). – P. 30–39.

22. Mahdiyar, A. A Monte Carlo technique in safety assessment of slope under seismic condition [Text] / A. Mahdiyar, M. Hasanipanah, D. J. Armaghani [and others] // *Engineering with Computers*. – 2017. – Vol. 33. – № 4. – P. 807–817.

23. Вайнберг, А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений [Текст] / А. И. Вайнберг. – Харьков : Тяжпромавтоматика, 2008. – 304 с.

24. Мозговий, А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва*. – Харків : ХДТУБА, 2011. – Вип. 65. – С. 364–370.

25. Мозговий, А. О. Основні передумови оцінки безпечності і надійності каскадів гідровузлів [Текст] / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва*. – Харків : ХДТУБА, 2009. – Вип. 54. – С. 272–277.

26. Мозговий, А. О. Загальні підходи щодо керування ризиком втрати надійності каскаду гідровузлів під час проходження катастрофічного паводку [Текст] / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва: матеріали VI Міжнар. наук. конф. «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд»*. – Харків : ХНУБА, 2013. – Вип. 73. – С. 531–536.

27. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву і спливання на прикладі



гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 161. – С. 90–101.

28. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 165. – С. 99–109.

29. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 174. – С. 70–80.

30. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду [Текст] / А. В. Яцик, А. І. Томільцева, М. Г. Томільцев [та ін.]; за ред. А. В. Яцика. – К. : Генеза, 2003. – 176 с.

31. Мозговий, А. О. Аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу температурних впливів за статистичними даними [Текст] / А. О. Мозговий // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2011. – Вип. 39. – С. 98–102.

32. Мозговий, А. О. Аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України. Вибір параметрів функції розподілу інтенсивності землетрусів за статистичними даними [Текст] / А. О. Мозговий // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХДТУБА, 2010. – Вип. 58. – С. 264–270.

33. Idriss, I. M. Evaluating Seismic Risk In Engineering Practice [Text] / I. M. Idriss // Proc. Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – San Fransisco, 1985. – Vol. 1. – P. 255–320.

34. Будівництво у сейсмічних районах України [Текст] : ДБН В.1.1–12:2014. – [Чинний від 2014–10–01]. – К. : Мінрегіон України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2014. – 110 с. – (Державні будівельні норми України).

35. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений [Текст] : пособие к разд. 5: Гидротехнические сооружения СНиП II-7-81. П 17-85. – Л. : Типография ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1986. – 310 с.

36. Основания гидротехнических сооружений [Текст] : СНиП 2.02.02-85. – [Действ. с 1987–01–01]. – М. : Госстрой СССР, ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 48 с. – (СНиП).

37. Проектирование оснований гидротехнических сооружений [Текст]: пособие к СНиП II-16-76. П 13-83. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1984. – 402 с.

38. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – 5-е изд. стер. – М. : Высшая школа, 1998. – 576 с.

---

Мозговий Андрій Олексійович, канд. техн. наук, доцент, кафедра геотехніки та підземних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (050)749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net.

Мозговой Андрей Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра геотехники и подземных сооружений Харьковского национального университета строительства и архитектуры. Тел.: (050)749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net.

Mozgovuy Andrii Oleksiiovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Hydraulic Engineering, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (050)749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net.

Статтю прийнято 30.11.2018 р.

УДК 691.3; 691.5

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛАСТИФІКУЮЧИХ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН У РОЗЧИНАХ І БЕТОНАХ НА ОСНОВІ ЛУЖНИХ ЦЕМЕНТІВ

Доктори техн. наук Р. Ф. Рунова, В. І. Гоц, кандидати техн. наук І. І. Руденко, О. М. Петропавловський, О. П. Констатиновський, О. В. Ластівка

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В РАСТВОРАХ И БЕТОНАХ НА ОСНОВЕ ЩЕЛОЧНЫХ ЦЕМЕНТОВ

Доктора техн. наук Р. Ф. Рунова, В. И. Гоц, кандидаты техн. наук И. И. Руденко, О. Н. Петропавловский, А. П. Констатиновский, О. В. Ластивка

## THE EFFICIENCY OF PLASTICIZING SURFACTANTS IN ALKALI-ACTIVATED CEMENT MORTARS AND CONCRETES

D. Sc. (Tech.) R. F. Runova, V. I. Gots, PhD (Tech.) I. I. Rudenko, O. M. Petropavlovskiy, O. P. Konstantynovskiy, O. V. Lastivka

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.182.2018.159703>

---

*Роботу присвячено визначенню хімічної природи добавок пластифікуючої групи, ефективних для модифікації властивостей будівельних розчинів і бетонів на основі лужних цементів при збільшенні вмісту доменного гранульованого шлаку до 100 % і відповідного вмісту солей натрію. Показано підвищення ефективності добавок без складноефірних зв'язків у молекулярній структурі (лігносульфонат натрію, добавки на основі поліетиленгліколю та ациклического поліаміну). Виявлені закономірності використано при розробленні складів анкерних сухих будівельних сумішей і товарних бетонних сумішей.*

**Ключові слова:** лужний цемент, поверхнево-активна речовина, пластифікуюча добавка, будівельний розчин, бетон.

*Работа посвящена определению химической природы добавок пластифицирующей группы, эффективных для модификации свойств строительных растворов и бетонов на основе щелочных цементов при увеличении содержания доменного гранулированного шлака до 100 % и соответствующего содержания солей натрия. Показано повышение эффективности добавок без сложноэфирных связей в молекулярной структуре (лигносульфонат натрия, добавки на основе полиэтиленгликоля и ациклического полиамин). Выявленные закономерности использованы при разработке составов анкерных сухих строительных смесей и товарных бетонных смесей.*

**Ключевые слова:** щелочной цемент, поверхностно-активное вещество, пластифицирующая добавка, строительный раствор, бетон.

*Application of alkali-activated cements (AAC) allows to provide high quality functional and durable mortars and concretes in the view of efficient application of raw materials and energy supplies. There are five types of AACs depending on their composition. Thus the basic factor of AAC composition change can be considered as part of granulated blast furnace slag (GBFS) that changing from 0 % to 100 % in aluminosilicate component of cement. Compounds of alkaline metals are considered as AAC structurization components, which contents depend on AAC type. Functionality of mortars and concretes is regulated by surfactants, which act as plasticizing*

*admixtures. However modification of AAC by admixtures has certain features connected with risk of molecular structure degradation in hydration medium of AAC due to alkaline hydrolysis (saponification). The emergence and speed of this process are determined first of all by AAC composition including nature (group) of alkaline component. The objective was to determine the chemical nature of plasticizers effective for property modification of mortars and concretes based on AACs with various content of GBFS (from 0 to 100 %) and appropriate alkaline component content. Stability of plasticizers' molecular structure in hydrated medium of AAC with different content of GBFS was investigated by means of infrared spectroscopy. It was shown that admixtures with ester bonds undergo of molecular structure degradation as a result of alkaline hydrolysis at increasing pH values that is caused by content of alkaline component and depends on the nature of alkaline component. Admixtures without ester bonds (sodium lignosulphonate, ones based on polyethylene glycol and acyclic polyamine) are characterized by stability of molecule regardless of alkaline component content. The effective admixtures were used in dry mixes for anchoring (consistency of mortar 150 mm by Vicat cone; 1 d tensile strength in bending / compressive strength of mortar = 6,6 / 30,6 MPa) and in ready-mixed concretes (consistency class changed from S1 to S3, S4 with consistency safety during 60 min; 3 d compressive strength of concrete was not less than the reference one without admixtures).*

**Keywords:** alkali-activated cement, surfactant, plasticizing admixture, mortar, concrete.

**Вступ.** Використання лужних (лужно-активованих) цементів відповідає концепції сталого розвитку людства і тенденціям сучасного будівництва в частині ефективного використання сировини та енергоресурсів при забезпеченні високої якості, функціональності і довговічності матеріалів. Пріоритет у розробленні ЛЦ належить В. Д. Глуховському [1, 2]. Заснована ним наукова школа під керівництвом П. В. Кривенка запропонувала принципи композиційної побудови ЛЦ [3, 4], у т. ч. із залученням попутних продуктів і відходів промисловості [5, 6]. Для практики застосування ЛЦ ці принципи реалізовано в національному стандарті України ДСТУ Б В.2.7-181:2009 [7]. Залежно від композиційного складу розрізняють п'ять типів ЛЦ (частка маси алюмосилікатних компонентів): I – гранульований доменний шлак (ГДШ) (90-100), II – портландцементний клінкер (100), III – золавиносу або базальт (36-80), IV – ГДШ (36-89), V – сумарно ГДШ і золавиносу (90-95). Отже, основним чинником зміни композиційного складу ЛЦ можна вважати вміст ГДШ, який змінюється в діапазоні від 0 % (тип II) до 100 % (тип I) у складі алюмосилікатного компонента. Сполуки лужних металів

розглядаються в ЛЦ як структуроутворюючі компоненти, вміст яких залежить від типу цементу. Як необхідний інгредієнт для забезпечення задовільних строків тужавлення та активності до складу ЛЦ вводять лігносульфонат натрію (ЛСТ) [7, 8].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Застосування лужних цементів у сучасних бетонах і розчинах пов'язано з необхідністю використання хімічних добавок. Однак модифікація ЛЦ хімічними добавками має певні особливості, які визначаються в першу чергу ризиком деградації молекулярної структури добавок у гідратаційному середовищі лужних цементів внаслідок лужного гідролізу (омилення) [9, 10, 11]. Виникнення і швидкість протікання цього процесу визначається перш за все композиційним складом цементу, у т. ч. природою (групою) лужного компоненту [12].

У свою чергу ефективність дії поверхнево-активних речовин (ПАР) як хімічних добавок обумовлена їхньою поверхневою активністю і залежить від молекулярної маси і здатності до адсорбції на поверхні мінеральних частинок цементу.

У дослідженнях [13, 14, 15] показана сумісність ЛЦ з аліфатичними органічними

сполуками (поліспирти, поліефіри, оксигетильовані жирні спирти, солі карбонових кислот тощо) у якості ПАР з пластифікуючим ефектом дії. Відповідно ПАР можуть бути використані для зменшення вмісту води і поверхневого натягу порової рідини, що полегшує її міграцію в матеріалі. Відомо, що в такому випадку зменшуються напруження в поровому просторі, які є чинниками деформацій усадки [16]. У свою чергу усадка розглядається як один із критеріїв здатності цементних матеріалів до аутогенного самовідновлення [17]. Методи управління усадкою розчинів шляхом зміни складу ЛЦ розглянуто в роботі [18]. Необхідність забезпечення ефективного впливу пластифікуючих добавок як на дисперсійно-коагуляційну, так і на кристалізаційно-конденсаційну структуру бетонів і розчинів на основі ЛЦ вимагає обґрунтування принципів ознак ПАР.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою є обґрунтування ефективності пластифікаторів, представлених ПАР різних хімічних типів, у будівельних розчинах і бетонах при зміні композиційного складу ЛЦ.

**Сировинні матеріали.** У якості алюмосилікатних компонентів ЛЦ використано портландцементний клінкер (CaO – 66,15 %; SiO<sub>2</sub> – 22,61 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5,29 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,93 %; MgO – 0,84 %; Na<sub>2</sub>O – 0,15 %; K<sub>2</sub>O – 0,98 %; SO<sub>3</sub> – 0,50 %) і ГДШ (CaO – 47,30 %; SiO<sub>2</sub> – 39,00 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5,90 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,30 %; MgO – 5,82 %; MnO – 0,50 %; SO<sub>3</sub> – 1,50 %).

У якості лужних компонентів використано метасилікат натрію п'ятиводний Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O (МС) і соду кальциновану технічну Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (СК).

У якості сповільнювача тужавлення ЛЦ використано напівводний гіпс CaSO<sub>4</sub>·0,5H<sub>2</sub>O (НПГ), густина 2,7 г/см<sup>3</sup>.

Використано добавки пластифікуючої групи: «JK-04PP» на основі полікарбоксилатних ефірів (тип ПК) виробництва «JIANKAI» (Китай);

лігносульфонат натрію технічний (ЛСТ) виробництва «Vorrespers» (Норвегія); «Melflux PP100F» на основі модифікованого поліетиленгліколю (ПЕГ-М) виробництва «SKW Polymers» (Німеччина); ПЕГ-400 на основі поліетиленгліколю (ПЕГ) виробництва «Dow Chemical» (Німеччина); «Triameen Y12D» на основі ациклічного поліаміну (АПМ) виробництва «AkzoNobel» (Нідерланди).

**Процес дослідження.** Робота виконувалась у два етапи. На першому етапі досліджено стабільність молекулярної структури добавок пластифікуючої групи в гідратаційному середовищі ЛЦ з різним вмістом ГДШ за допомогою інфрачервоної спектроскопії (ІЧС) на спектрофотометрі Specord 75 IR (Німеччина).

У дослідженнях використовували п'ять складів ЛЦ, які згідно з ДСТУ Б В.2.7-181 належать до трьох типів:

– склад 1: клінкер – 97,6 %, МС – 2,4 % (0,7 % по Na<sub>2</sub>O) – тип II (лужний портландцемент, ЛПЦ);

– склад 2: клінкер – 67,0 %, ГДШ – 30,1 %, СК – 2,9 % (1,7 % по Na<sub>2</sub>O), склад 3: клінкер – 66,7 %, ГДШ – 30,0 %, МС – 3,3 % (1,0 % по Na<sub>2</sub>O) – тип IV (лужний шлакопортландцемент, ШПЦ);

– склад 4: ГДШ – 95,2 %, СК – 4,8 % (2,8 % по Na<sub>2</sub>O), склад 5: ГДШ – 94,3 %, МС – 5,7 % (1,7 % по Na<sub>2</sub>O) – тип I (шлаколужний цемент, ШЛЦ).

ЛЦ отримували шляхом сухого змішування компонентів у лабораторному лопатевому змішувачі «НОВАРТ». Питома поверхня цементів  $S_{\text{пит}} = 4500 \text{ см}^2/\text{г}$ . При помелі алюмосилікатних складових використано добавку у вигляді етилгідросилоксанового полімеру (0,04 %) для інтенсифікації помелу, запобігання сорбції вологи з повітря і збереження властивостей цементу.

Зразки (20x20x20 мм) для проб ІЧС були отримані з цементного тіста, отриманого змішуванням ЛЦ зазначених складів з додаванням пластифікуючої групи в кількості 10 % від маси ЛЦ при В/Ц = 0,4.

Отримані зразки тверділи протягом 7 діб у нормальних умовах (температура –  $20 \pm 2$  °C, вологість  $95 \pm 5$  %), після чого були висушені при температурі 40 °C до постійної маси та подрібнені до повного проходження проб через сито 0,08 мм.

На *другому етапі* розроблено склади сухих будівельних сумішей (СБС) і товарних бетонів на основі ЛЦ з використанням добавок, що характеризуються ефективністю.

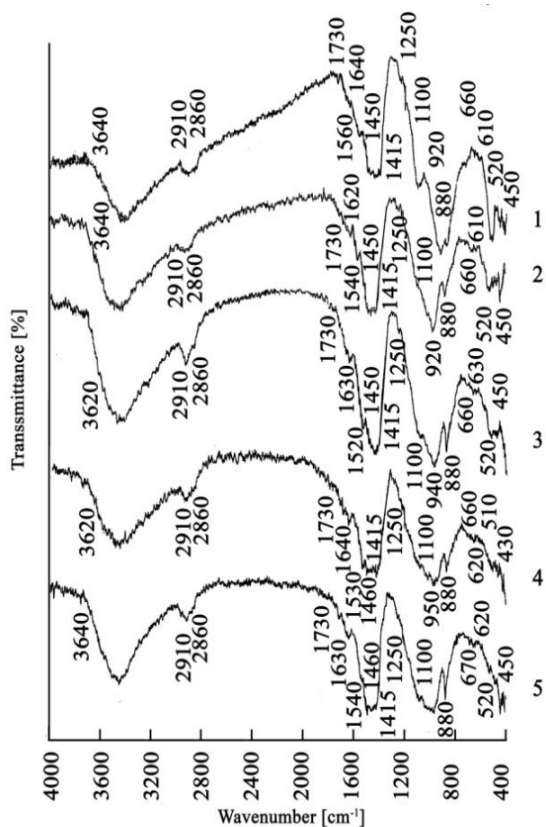
Клас консистенції бетонної суміші визначали за EN 12350-2:1999, міцність бетону – за EN 12390-3:2001. Розтічність розчинної суміші визначали за розпливом з кільця Віка (EN 196-3:2007), міцність анкерного розчину на стиск і на вигин – за

EN 12190:1999 і EN 196-1:2007 відповідно. Адгезію розчину визначали за EN 1542:1999.

**Основна частина дослідження.** На першому етапі досліджено зміни молекулярної будови ПАР різної хімічної природи в гідратаційному середовищі ЛЦ (рис. 1, 2, 3).

Затверділий камінь ЛЦ характеризується присутністю таких фаз (криві 1-5 на рис. 1, 2, 3): непрогідратовані силікати кальцію (450, 520, 870-880  $\text{cm}^{-1}$ ), гідросилікати кальцію (920-980, 3400-3450  $\text{cm}^{-1}$ ), хімічна зв'язана та адсорбційна вода гідросилікатів кальцію (3400-3450  $\text{cm}^{-1}$ ), молекулярна вода (1620-1650  $\text{cm}^{-1}$ ), гідроксид кальцію (3620-3660  $\text{cm}^{-1}$ ).

а



б

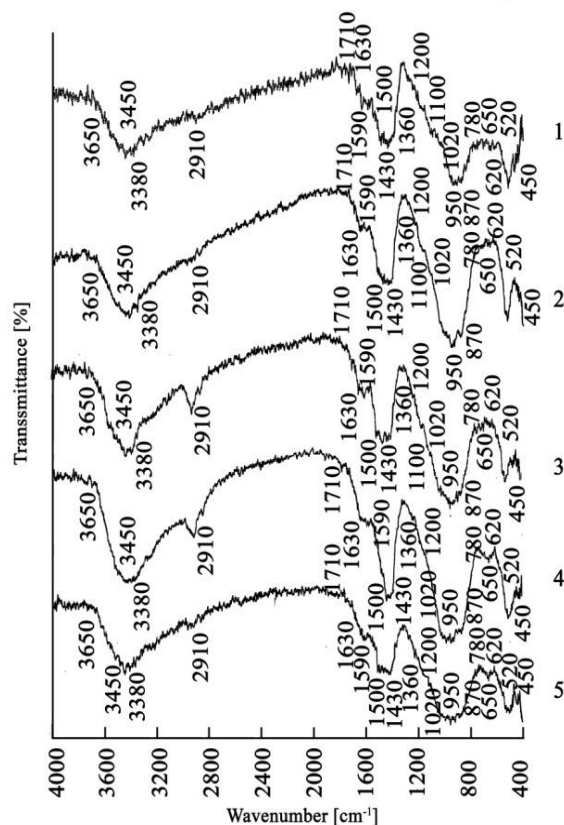
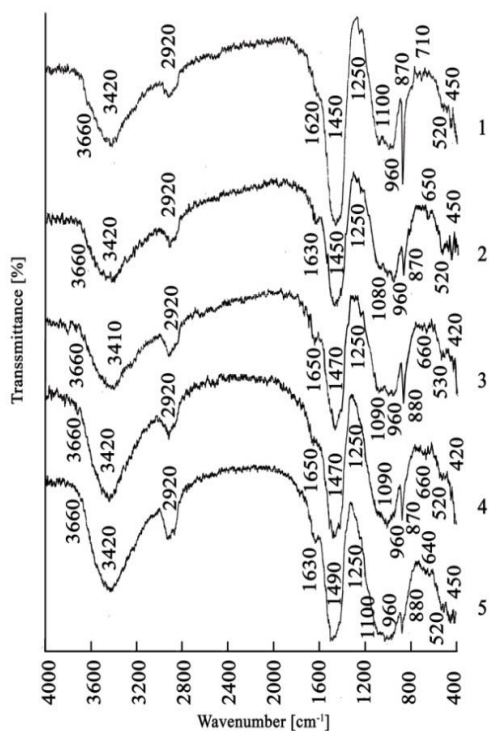


Рис. 1. ІЧ-спектри ПАР в середовищі ЛЦ: а – тип ПК; б – тип ЛСТ; 1 – ЛЦ складу 1; 2 – ЛЦ складу 2; 3 – ЛЦ складу 3; 4 – ЛЦ складу 4; 5 – ЛЦ складу 5

а



б

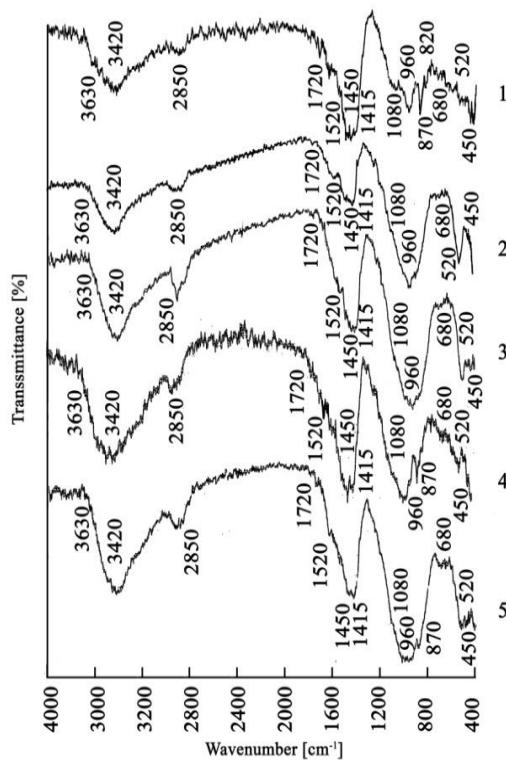


Рис. 2. ІЧ-спектри ПАР в середовищі ЛЦ: а – тип ПК; б – тип ЛСТ; в – тип ПЕГ; г – тип ПЕГ-М; 1 – ЛЦ складу 1; 2 – ЛЦ складу 2; 3 – ЛЦ складу 3; 4 – ЛЦ складу 4; 5 – ЛЦ складу 5

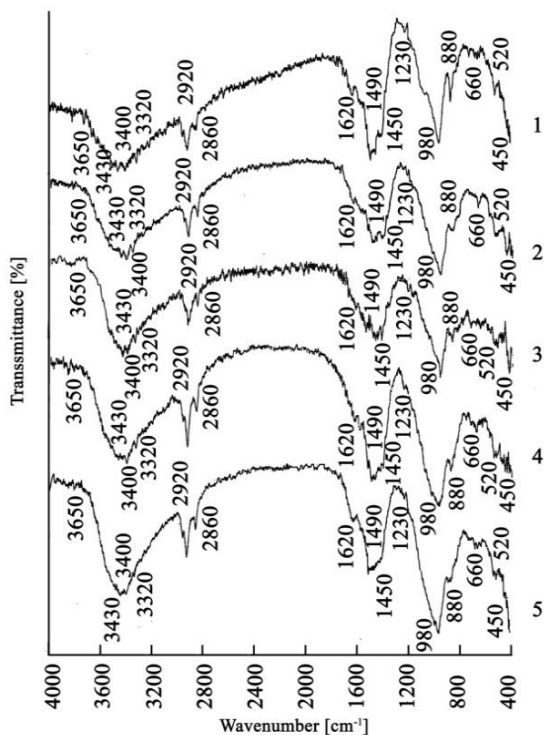


Рис. 3. ІЧ-спектри ПАР типу АПМ в середовищі ЛЦ: 1 – ЛЦ складу 1; 2 – ЛЦ складу 2; 3 – ЛЦ складу 3; 4 – ЛЦ складу 4; 5 – ЛЦ складу 5

За отриманими результатами, додавання ПАР типу ПК на кривих ІС (рис. 1,а) визначається ефектами при  $1730\text{ см}^{-1}$  і  $1100\text{ см}^{-1}$ , які відповідають групі  $\text{C}=\text{O}$  складних ефірів і групі  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  ( $\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2$ ) простих ефірів. При гідратації ЛЦ добавка типу ПК зазнає змін у структурі внаслідок лужного гідролізу ефірних груп, у результаті чого відбувається формування карбоксилатних солей і відповідних простих ефірів [19]. Це підтверджується присутністю ефектів, відповідних карбоксилатним групам  $\text{COO}^-$  ( $1415\text{ см}^{-1}$ ,  $1520-1560\text{ см}^{-1}$ ). Однак гідроліз є частковим, про що свідчить ефект при  $1730\text{ см}^{-1}$  на кривих 1-5. Збільшення в складі ЛЦ вмісту лужного компонента (по  $\text{Na}_2\text{O}$ ) від 0,7 % (крива 1) до 1,7 % (крива 5), обумовлене збільшенням вмісту ГДШ, призводить до більшої деструкції добавки типу ПК внаслідок гідролізу, що підтверджує збільшення ефекту при  $1415$ ,  $1520-1560\text{ см}^{-1}$  і зменшення при  $1730$  і  $1100\text{ см}^{-1}$ . Отже, у гідратаційному середовищі ЛЦ добавка типу ПК зазнає змін у структурі, при яких головний ланцюг, що включає карбоксилатні групи, адсорбується на поверхні часток алюмосилікатної складової цементу, а бічні ланцюги, що містять прості ефіри і відповідають за стеричний ефект дії, відриваються від головного ланцюга. Відповідно при збільшенні вмісту в складі ЛЦ лужного компонента (по  $\text{Na}_2\text{O}$ ) від 0,7 (ЛЦ тип II) до 1,7 % (ЛЦ тип IV) пластифікуючий ефект добавки типу ПК значно зменшується. Також слід відзначити більшу деструкцію добавки в середовищі ЛЦ складу 5 (крива 5) порівняно зі складом 2 (крива 2) при використанні МС замість СК, навіть при однаковому вмісті лужного компонента в перерахунку на  $\text{Na}_2\text{O}$  – 1,7 %. Більшу дегградацію молекулярної структури добавки в присутності МС порівняно з СК можна пояснити більшим значенням показника рН – 12,6 і 11,3 відповідно. Отже, чинниками, від яких залежить стабільність молекулярної структури добавки типу ПК в

гідратаційному середовищі ЛЦ, є вміст і природа лужного компонента, що обумовлюють рН середовища.

Добавка ЛСТ, на відміну від типу ПК, у середовищі ЛЦ не зазнає змін у структурі при збільшенні вмісту лужного компонента, що підтверджується присутністю відповідних смуг поглинання на всіх кривих (рис. 1,б):  $620$ ,  $650$ ,  $780\text{ см}^{-1}$  ( $\text{CH}_2$  зв'язки);  $660$ ,  $1200\text{ см}^{-1}$  (групи  $\text{SO}_3$ );  $1020\text{ см}^{-1}$  (групи  $\text{OH}^-$ );  $1100\text{ см}^{-1}$  (групи спиртів  $\text{OH}$ );  $1360\text{ см}^{-1}$  (групи  $\text{CH}_3$ );  $1430$ ,  $1500$ ,  $1590\text{ см}^{-1}$  (заміщене ароматичне кільце лігніну);  $1630\text{ см}^{-1}$  ( $\text{C}=\text{C}$  зв'язки в бензольному кільці, карбонільні групи  $\text{C}=\text{O}$  та карбоксильні групи  $\text{COOH}$ );  $1710\text{ см}^{-1}$  (група ароматичних кислот  $\text{C}=\text{O}$  та групи  $\text{COOH}$ );  $2910\text{ см}^{-1}$  ( $\text{CH}_2$  зв'язки);  $3380$ ,  $3450\text{ см}^{-1}$  ( $\text{O}-\text{H}$  зв'язки в гідроксильних, фенольних, спиртових і карбоксильних групах). Отримані результати щодо стабільності молекулярної структури добавок типу ЛСТ в середовищі ЛЦ корелюють з результатами досліджень роботи [20].

Незалежно від вмісту лужного компонента структура добавки типу ПЕГ також не зазнає змін, характеристичні смуги поглинання якої присутні на всіх спектрах (рис. 2, а):  $710$ ,  $2920\text{ см}^{-1}$  ( $\text{CH}_2$  зв'язки),  $1100\text{ см}^{-1}$  (група простих ефірів  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ) і  $3620\text{ см}^{-1}$  (групи  $\text{OH}^-$ ). Відомо, що ПЕГ ( $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$ ) є неіоногенною ПАР і не характеризується самостійним диспергуючим ефектом дії. Однак ця органічна речовина працює як диспергатор при наданні йому можливості адсорбуватись на поверхні цементу шляхом прикріплення до карбоксильних груп ( $-\text{COOH}$ ) молекул суперпластифікатора [21]. Даний шлях підвищення ступеня адсорбції пластифікуючих добавок на частинках цементу реалізовано в добавці типу ПЕГ-М (Melflux PP100F), яка є сополімером ПЕГ і акрилової кислоти. Добавки такої молекулярної структури забезпечують значно вищий пластифікуючий ефект дії, але у високолужному середовищі ЛЦ зазнають деструкції. За отриманими резуль-

татами (рис. 2, б), добавка типу ПЕГ-М в середовищі ЛЦ типу II (крива 1) зазнає незначних змін при відносно низькому вмісті лужного компонента, про що свідчить ефект при  $1720\text{ см}^{-1}$  (складноєфірні групи C=O). При цьому добавка зазнає часткового лужного гідролізу, що підтверджується присутністю на кривій смуг поглинання при  $1415$  і  $1520\text{ см}^{-1}$  (карбоксільні групи). Збільшення вмісту лужного компонента (по  $\text{Na}_2\text{O}$ ) від 0,7 (крива 1) до 1,7 % (крива 5) призводить до більшої деструкції молекули ПАР внаслідок лужного гідролізу, про що свідчить зменшення ефекту складноєфірних груп при  $1720\text{ см}^{-1}$  і збільшення ефектів при  $1415$  і  $1520\text{ см}^{-1}$ . Вплив на стабільність молекулярної структури добавки типу ПЕГ-М має також природа лужного компонента: при використанні МС деструкція добавки більша порівняно з СК.

У якості пластифікуючої добавки, яка характеризується стабільністю молекулярної структури у високолужному середовищі, використано додецилдіпропілентіамін ( $(\text{CH}_2)_3\text{NH}_2\text{-RN-(CH}_2)_3\text{NH}_2$ , де R – алкільний ланцюг) – ациклічний поліамін (тип АПМ), який є катіонактивною ПАР. На кривих ІЧС добавка такого типу не зазнає деструкції внаслідок гідролізу, що підтверджує присутність на всіх кривих (рис. 3) смуг поглинання при  $1230\text{ см}^{-1}$  (C–N зв'язок, аліфатичні аміни),  $1450\text{ см}^{-1}$  ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ),  $1490\text{ см}^{-1}$  (C–H, ароматичні аміни),  $1620\text{ см}^{-1}$  (N–H зв'язок, первинні аміни),  $2860$  і  $2920$  ( $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}_3$ ),  $3320$  і  $3430$  (два зв'язки N–H, первинні аміни).

Отже ефективними добавками, які характеризуються стабільністю молекулярної структури в гідратаційному середовищі ЛЦ в усьому діапазоні зміни вмісту лужного компоненту, є ПАР типу ЛСТ, ПЕГ і АПМ. Добавки типу ПК і ПЕГ-М є ефективними при незначному вмісті лужного компонента, тобто  $\sim 0,7\%$  по  $\text{Na}_2\text{O}$  (ЛЦ типу II). При збільшенні показника рН середовища, обумовленого вмістом і природою лужного компонента,

ефективність добавок зі складноєфірними зв'язками значно зменшується внаслідок деструкції їхньої молекулярної структури (лужний гідроліз).

На другому етапі досліджень виявлені закономірності використано при розробленні складів анкерних СБС та товарних бетонних сумішей.

У якості основи СБС для анкерування використано ЛЦ типу II системи «клінкер–МС–напівводний гіпс», монолітного бетону – ЛЦ типу I і IV системи «клінкер–ГДШ–лужний компонент (МС, СК)–ЛСТ». Як обов'язковий компонент ЛЦ типів I і IV для забезпечення задовільних строків тужавлення та активності використано добавку ЛСТ в кількості 0,8 % маси алюмосилікатних складових.

Альтернативою двоводному гіпсу для регулювання строків тужавлення і підвищення фізико-механічних властивостей ЛЦ є добавка напівводного гіпсу [8, 22]. Вміст напівводного гіпсу в складі ЛЦ типу II становить 9,0 і 6,5 % (понад 100 % алюмосилікатних компонентів) для ЛЦ типів II і IV відповідно.

Добавка типу ПЕГ-М (Melflux PP100F) використана в якості водоредукуючої добавки в складі сухої будівельної суміші для анкерування на основі ЛЦ типу II. Розчини, модифіковані даною добавкою, характеризуються міцністю на розтяг при вигині / міцністю на стиск – 6,6/30,6 МПа після 1 доби тверднення і адгезією 1,1 МПа при розтічності розчинної суміші 150 мм з кільця Віка.

Добавки типу ПЕГ і АПМ були використані в складі товарного бетону на основі ЛЦ типів I і IV системи «клінкер–ГДШ–лужний компонент (МС, СК)–напівводний гіпс». Отримані комплекси «ЛСТ–ПЕГ» і «ЛСТ–АПМ» забезпечували зміну класу консистенції суміші від S1 до S3, S4 і збереження консистенції суміші протягом 60 хв. Міцність на стиск модифікованого бетону при цьому залишалась на рівні аналога без добавки.



**Висновки.** Хімічні добавки типу ПК і ПЕГ-М, що містять складноєфірні зв'язки, зазнають деструкції молекулярної структури внаслідок лужного гідролізу при збільшенні показника рН гідратаційного середовища ЛЦ, обумовленого вмістом лужного компонента в складі ЛЦ і природою лужного компонента. Добавки типу ЛСТ, ПЕГ і АПМ характеризуються стабільністю молекул незалежно від вмісту лужного компонента. Це обумовлює ефективність використання добавок на основі складних полієфірів (ПК і ПЕГ-М) в ЛЦ типу II (0 % ГДШ) з відносно низьким вмістом лужного компонента. При збільшенні вмісту лужного компонента відповідно до збільшення ГДШ в ЛЦ типів I і IV

ефективність добавок без складноєфірних зв'язків (ЛСТ, ПЕГ і АПМ) збільшується.

Використання отриманих закономірностей зміни ефективності пластифікуючих добавок залежно від композиційного складу лужних цементів є необхідним при розробленні рецептур бетонів і будівельних розчинів на їхній основі. Так, ЛЦ типу II при використанні добавки типу ПЕГ-М доцільно використовувати в якості основи бетонів і розчинів з інтенсивним набором міцності, зокрема анкерних розчинів. ЛЦ типів I і IV, модифіковані добавками типу ПЕГ і АПМ в комплексі з ЛСТ, є ефективною в'язучою речовиною в товарних бетонних сумішах для монолітного будівництва.

### *Список використаних джерел*

1. Glukhovsky, V. High strength slag-alkali cement [Text] / V. Glukhovsky, G. Rostovskaya, G. Rumina // 7<sup>th</sup> Int. Congr. on the Chemistry of Cements. – Paris, 1980. – Vol. III. – P. 164-168.
2. Глуховский, В. Д. Щелочные и щелочно-щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны [Текст] / под общ. ред. В. Д. Глуховского. – К. : Вища школа, 1979. – 232 с.
3. Krivenko, P. Why alkaline activation – 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials [Text] / P. Krivenko // Journal of Ceramic Science and Technology 8(3). – 2017. – P. 323-333.
4. The Development of Alkali-activated Cement Mixtures for Fast Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures [Text] / P. Krivenko, O. Petropavlovskii, H. Vozniuk, S. Lakusta // Procedia Engineering 195. – 2017. – P. 142-146.
5. Radiological characterization and evaluation of high volume bauxite residue alkali activated concretes [Text] / T. Croymans, W. Schroeyers, P. Krivenko, O. Kovalchuk, A. Pasko, M. Hult, G. Marissens, G. Lutter & S. Schreurs // Journal of Environmental Radioactivity 168. – 2017. – P. 21-29.
6. Development of alkali activated cements and concrete mixture design with high volumes of red mud [Text] / P. Krivenko, O. Kovalchuk, A. Pasko, T. Croymans, M. Hult, G. Lutter, N. Vandevenne, S. Schreurs & W. Schroeyers // Construction and Building Materials 151. – 2017. – P. 819-826.
7. ДСТУ Б В.2.7-181:2009: Лужні цементы. Технічні умови.
8. Ластівка, О. В. Модифіковані бетони на основі лужного шлакопортландцементу для монолітного будівництва [Текст] : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.05 / О. В. Ластівка. – К. : КНУБА, 2015. – 21 с.
9. Influence of D-sorbitol on the properties of binders to immobilize acid nuclear wastes [Text] / M. Collepari, G. Grossi, Pellizon Birelli M., G. Ventura // 8<sup>th</sup> CANMET/ACI Int. Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Sorrento (Italy). – 2006. – P. 525-531.

10. Palacios, M. Effect of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures on alkali-activated slag pastes and mortars [Text] / M. Palacios, F. Puertas // *Cement and Concrete Research*, 35. – 2005. – P. 1358-1367.
11. Efficiency of redispersible polymer powders in mortars for anchoring application based on alkali activated Portland cements [Text] / I. Rudenko, O. Konstantynovskiy, A. Kovalchuk, M. Nikolainko, D. Obremsky // *Key Engineering Materials*, Switzerland. – 2018. – Vol. 761. – P. 27-30.
12. Щелочные цементы [Текст]: монография / П. В. Кривенко, Р. Ф. Рунова, М. А. Саницкий, И. И. Руденко. – К. : ООО «Основа», 2015. – 412 с.
13. Potential of alkali activated portland cement-based dry mixes for anchoring application [Text] / P. Krivenko, R. Runova, I. Rudenko, O. Konstantynovskiy // *NTCC2014: International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete*, Brno University of Technology. – 2014. – P. 123-126.
14. Efficiency of redispersible polymer powders in mortars for anchoring application based on alkali activated portland cements [Text] / I. Rudenko, O. Konstantynovskiy, A. Kovalchuk, M. Nikolainko, D. Obremsky // *Key Engineering Materials*. – Switzerland. – 2018. – Vol. 761. – P. 27–30.
15. Analysis of plasticizer effectiveness during alkaline cement structure formation [Text] / P. Krivenko, R. Runova, I. Rudenko, V. Skoryk, V. Omelchuk // *Eastern European journal of Enterprise Technologies* 4. – 2017. – P. 35-41.
16. Palacios, M. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes [Text] / M. Palacios, F. Puertas // *Cem Concr Res* 37. - 2007. – P. 691–702.
17. Lv, Z. Overview or recent work on self-healing in cementitious materials [Text] / Z. Lv // *Materiales de Construccion*. – 2014. – 64 p.
18. Shrinkage behavior of alkali-activated slag cement pastes [Text] / V. Omelchuk, Y. Guang, R. Runova, I. Rudenko // *Key Engineering Materials*. – Switzerland. – 2018. – Vol. 761. – P. 45-48.
19. Palacios, M. Techniques and methods of characterization of admixtures for the concrete [Text] / M. Palacios, C. Sierra, F. Puertas // *Mater. Construcc.* 53 (269) (2003), P. 89-105.
20. Constructive properties of the concretes made with alkali-activated cements of new generation [Text] / P. V. Krivenko, O. N. Petropavlovskii, G. V. Vozniuk, V. I. Pushkar // *First Intern. Conf. on Advances of Chemically-activated Materials (CAM' 2010 - China)*, 2010, Jinan, Shandong, China. – P. 139-146.
21. Yamada, K. Basics Basics of analytical methods used for the investigation of interaction mechanism between cements and superplasticizers [Text] / K. Yamada // *Cement and Concrete Research* 41. – 2011. – P. 793-798.
22. Effect of calcium sulfate modifications on properties of alkaline cements [Text] / V. I. Gots, R. F. Runova, I. I. Rudenko, O. P. Konstantynovskiy, O. V. Lastivka // *19. Ibausil, Weimar*, 2015. – 1-1087-1-1094.

---

Рунова Раїса Федорівна, д-р техн. наук, професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (044) 245-48-43. E-mail: runova@i.ua.  
Гоц Володимир Іванович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (044) 248-30-16.  
E-mail: lubov.vynnyk@gmail.com.  
Руденко Ігор Ігорович, канд. техн. наук, старш. наук. співроб. Науково-дослідного інституту в'язучих матеріалів ім. В. Д. Глуховського. Тел.: (044) 241-54-92. E-mail: igor.i.rudenko@gmail.com.  
Петропавловський Олег Миколайович, канд. техн. наук, старш. наук. співр. Науково-дослідного інституту в'язучих матеріалів ім. В. Д. Глуховського. Тел.: (044) 241-54-44. E-mail: oleg.petropavlovskii@gmail.com.

---

Константиновський Олександр Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (044) 245-48-43.  
E-mail: alexandrkp@gmail.com.

Ластівка Олесь Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (044) 245-48-43.  
E-mail: oles.lastivka@gmail.com.

Рунова Раїса Федорівна, д-р техн. наук, професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (044) 245-48-43.  
E-mail: runova@i.ua.

Гоц Володимир Іванович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури.  
Тел.: (044) 248-30-16. E-mail: lubov.vynnyk@gmail.com.

Руденко Ігорь Ігоревич, канд. техн. наук, старш. науч. сотр. Научно-исследовательского института вяжущих материалов им. В. Д. Глуховского. Тел.: (044) 241-54-92. E-mail: igor.i.rudenko@gmail.com.

Петропавловський Олег Николаевич, канд. техн. наук, старш. науч. сотр. Научно-исследовательского института вяжущих материалов им. В. Д. Глуховского. Тел.: (044) 241-54-44. E-mail: oleg.petropavlovskii@gmail.com.

Константиновський Олександр Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури.  
Тел.: (044) 245-48-43. E-mail: alexandrkp@gmail.com.

Ластівка Олесь Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (044) 245-48-43.  
E-mail: oles.lastivka@gmail.com.

Runova Raisa Fedorivna, D. Sc. (Tech.), professor, Department of Technology of Building Constructions and Products (TBSP), Kyiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (044) 245-48-43. E-mail: runova@i.ua.

Gots Volodymyr Ivanovych, D. Sc. (Tech.), professor, Head of Department of Building Constructions and Products (TBSP), Kyiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (044) 248-30-16.  
E-mail: lubov.vynnyk@gmail.com.

Rudenko Igor Igorevych, PhD (Tech.), senior scientist, Scientific Research Institute for Binders and Materials. Tel.: (044) 241-54-92. E-mail: igor.i.rudenko@gmail.com.

Petropavlovskiy Oleh Mykolaiovych, PhD (Tech.), senior scientist, Scientific Research Institute for Binders and Materials. Tel.: (044) 241-54-44. E-mail: oleg.petropavlovskii@gmail.com.

Konstantynovskiy Oleksandr Petrovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Technology of Building Constructions and Products (TBSP), Kyiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (044) 245-48-43.  
E-mail: alexandrkp@gmail.com.

Lastivka Oles' Vasyliovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Technology of Building Constructions and Products (TBSP), Kyiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (044) 245-48-43.  
E-mail: oles.lastivka@gmail.com.

Статтю прийнято 06.12.2018 р.

УДК 699.887.5

**РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ З ЗАХИСТУ ШТУЧНИХ СПОРУД ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ ВІД ЕЛЕКТРОКОРОЗІЇ ПІД ДІЄЮ ЗМІННОГО СТРУМУ ВИТОКУ  
І ВИСОКОВОЛЬТНОЇ НАПРУГИ**

Кандидати техн. наук О. С. Борзяк, О. А. Дудін, М. Ю. Куценко,  
викладач В. Г. Познякова

**РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЗАЩИТЕ ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ОТ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ ПОД  
ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА УТЕЧКИ И ВИСОКОВОЛЬТНОГО  
НАПРЯЖЕНИЯ**

Кандидаты техн. наук О. С. Борзяк, А. А. Дудин, М. Ю. Куценко,  
преподаватель В. Г. Познякова

**DEVELOPMENT OF MEASURES FOR THE PROTECTION OF STRUCTURES OF  
RAILWAY TRANSPORT AGAINST ELECTROCORROSION UNDER ACTION OF  
ALTERNATING CURRENT LEAKAGE AND HIGH-VOLTAGE TENSION**

PhD (Tech.) O. S. Borziak, O. A. Dudin, M. Y. Kutsenko, teacher V. G. Poznyakova

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.182.2018.159746>

---

*Аналіз літературних, експериментально-теоретичних даних і експлуатаційних досліджень свідчить про суттєвий руйнівний вплив змінного струму витоку та високовольтної напруги на конструкції штучних споруд залізничного транспорту України. Всі існуючі методи захисту від електрокорозії не враховують дійсний механізм корозійного руйнування неметалевих деталей конструкції. Розроблено заходи та конструктивні рішення з захисту бетонних, залізобетонних і кам'яних інженерних споруд залізниць від електрокорозії, що викликана змінною високовольтною напругою і струмами витоку: суцільний сталевий екран із глибинним заземлювачем; сітчасті екрани понизу опор із глибинним заземленням; рідкоскляні екрани з глибинним заземленням. Ефективність наведених заходів обумовлена врахуванням дійсного механізму руйнування сталеві арматури та бетону конструкцій.*

**Ключові слова:** блукальний струм, струм витоку, змінний струм, високовольтна напруга, електрокорозія, штучна споруда, захисний екран.

*Анализ литературных, экспериментально-теоретических данных и эксплуатационных исследований свидетельствует о существенном разрушительном воздействии переменного тока утечки и высоковольтного напряжения на конструкции искусственных сооружений железнодорожного транспорта Украины. Все существующие методы защиты от электрокоррозии не учитывают реальный механизм коррозионного разрушения неметаллических деталей конструкции. Разработаны мероприятия и конструктивные решения по защите бетонных, железобетонных и каменных инженерных сооружений железных дорог от электрокоррозии, вызванной переменным высоковольтным напряжением и токами утечки: сплошной стальной экран с глубинным заземлением; сетчатые экраны внизу опор с глубинным заземлением; жидкостекольный экран с*

глубинным заземлением. Эффективность разработанных мероприятий обусловлена учетом действительного механизма разрушения стальной арматуры и бетона конструкций.

**Ключевые слова:** блуждающий ток, ток утечки, переменный ток, высоковольтное напряжение, электрокоррозия, искусственное сооружение, защитный экран.

*The destructive effects of the corrosive effects of stray and leakage currents are observed in almost all industries. The question is the most relevant for the railways. It is known that direct (DC) leakage currents and stray currents cause significant corrosion damage. It is supposed that corrosion from alternating current exposure is more moderate and does not cause significant damage. However, the analysis of literature data, data of theoretical, experimental and exploitative research indicates a significant destructive effect of alternating leakage current and high voltage on the structures of railway facilities in Ukraine. At the same time, measures to prevent electrocorrosion of reinforced concrete and other structures by alternating current are not provided for in the regulatory documents for railway structures. One of the reasons for this is the specificity of the processes of electro-corrosion of concrete, reinforced concrete and mortar in flooded structures.*

*All existed methods of protection against electro-corrosion do not take into account the real mechanism of corrosion destruction of non-metallic parts of the structure. Based on this, it became necessary to develop schemes and constructive solutions for the protection of railway structures against electrocorrosion caused by alternating current, based on the fundamental principles of colloidal chemistry and physico-chemical mechanics.*

*Developed measures and constructive solutions for the protection of concrete, reinforced concrete and stone engineering structures of railways from electrocorrosion caused by alternating high-voltage and leakage currents: solid steel screen with a deep grounding; mesh screens at the bottom of the supports with deep grounding; liquid glass screen with deep grounding. The effectiveness of the developed measures is caused by taking into account the actual mechanism of destruction of steel reinforcement and concrete structures.*

**Keywords:** stray current, leakage current, alternating current, high-voltage tension, electrocorrosion, artificial constructions, protective screens.

**Вступ.** Практично у всіх галузях промисловості спостерігаються руйнівні наслідки корозійного впливу блукальних струмів і струмів витоку, що призводять до значних збитків. Найбільш актуальним це питання є для залізниць [1]. Відомо [2], що постійні струми витоку та блукальні струми викликають значні корозійні пошкодження, одночасно вважається [3], що корозія від дії змінного струму більш помірна та не викликає значних пошкоджень.

В Україні електрифіковані ділянки становлять 41,7 % загальної протяжності, з яких 51 % електрифіковано змінним струмом. Частка ділянок залізниць на змінному струмі зростає, тому що він є більш економічним і вважається корозійно

безпечним. Проте аналіз літературних даних [4] і багаторічні спостереження [5-8] вчених Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) свідчать про те, що для багатьох обводнених бетонних, залізобетонних і кам'яних конструкцій мостів, тунелів, водопропускних труб, інших споруд на електрифікованих змінним струмом ділянках залізниць, а також інших обводнених конструкцій, що перебувають під впливом високовольтної змінної напруги, зокрема ліній електропередачі (ЛЕП), спостерігається їхня інтенсивна електрокорозія.

Разом з тим заходи щодо запобігання електрокорозії залізобетонних та інших конструкцій змінним струмом у

нормативних документах для залізничних споруд не передбачаються. Однією з причин цього є специфіка процесів електрокорозії бетону, залізобетону та розчину в обводнених конструкціях, що не укладається в рамки традиційної електрофізики й електротехніки, і відсутність у зв'язку з цим єдності думок різних вчених і фахівців щодо впливу змінного струму на залізобетонні, бетонні та кам'яні конструкції.

Виходячи з цього виникла необхідність розроблення схем і конструктивних рішень з захисту споруд залізниць від електрокорозії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Корозія металевих конструкцій від впливу постійного струму витоку досить глибоко та всебічно вивчена. На сьогодні розроблено цілий спектр заходів з захисту металевих конструкцій від впливу блукальних струмів на підприємствах хімічної та кольорової металургійної промисловості [9], а також захисту підземних конструкцій трубопроводів [10]. На залізницях, незалежно від виду струму, на всіх металевих спорудах (мости, шляхопроводи, опори), на яких кріпляться елементи контактної мережі, передбачається заземлення [11]. На залізобетонних опорах і неметалевих штучних спорудах заземляють деталі кріплення контактної мережі або їх обладнують пристроями захисного відключення при потраплянні на споруди і конструкції високої напруги, ці заходи захисту передбачаються для забезпечення безпеки людей.

Для призупинення корозії здійснюють проведення комплексу основних заходів [12]:

1. Ізоляція поверхні металу від навколишнього середовища шляхом нанесення захисних покриттів (пасивний захист). Такий чисто технологічний метод захисту є обов'язковим і ефективним, але недостатнім. Він застосовується в комплексі з активними методами захисту для зниження енерговитрат і підвищення

ефективності основного, активного захисту – електрохімічного.

2. Електрохімічний захист (ЕХЗ) полягає в примусовому зміщенні потенціалу споруди в область захисних значень (близько  $(0,9 \div 1,2)$  В відносно мідно-сульфатного електрода порівняння).

Для захисту від електрокорозії залізобетонних конструкцій споруд рейкового транспорту, електрифікованого змінним струмом, передбачають встановлення електроізолювальних деталей і пристроїв, що забезпечують електричний опір не менше 10000 Ом, кола заземлення опор контактної мережі і деталей кріплення контактної мережі до елементів конструкцій мостів, естакад, тунелів і т. п. [11]. У цьому випадку небезпека електрокорозії залізобетонних конструкцій у період експлуатації не встановлюється, оскільки вказаний електричний опір, при якому відсутня небезпека електрокорозії, забезпечується при виконанні вимог, необхідних для нормальної роботи рейкових кіл автоблокування.

Для захисту від наведеної напруги на проводах контактної мережі, а також повітряних і кабельних ліній дроти знеструмлюють і заземлюють з двох сторін заземлювальними штангами, розташовуючи їх одна від одної на відстані не більше 200 м (контактна мережа) і 100 м (інші дроти) [13].

Згідно з роботою [14] захист сталевих трубопроводів від корозії в зонах небезпечного впливу змінного струму повинний здійснюватися захисними покриттями і катодною поляризацією [15-17] незалежно від корозійної агресивності ґрунтів. Катодний захист трубопроводів здійснюється застосуванням зовнішніх джерел постійного струму, зокрема станцій катодного захисту, мінус яких з'єднується з трубою, а плюс – з анодним заземленням (електричний метод).

За роботою [18], для захисту споруд, розташованих у зоні впливу змінних блукальних струмів, використовують також

поляризований дренажний пристрій з додатковим діодом і ємністю в електричній схемі і струмовідводом. У цьому випадку спорудження поляризується постійно, навіть у момент додатних значень потенціалів рейок. Пристрій дозволяє здійснювати захист підземних споруд за рахунок накопичення енергії блукальних струмів за допомогою ємності, ввімкненої на напругу витоку «рейка-споруда» при негативних потенціалах рейок і розряду ємності спорудження при позитивних потенціалах рейок. Більш складним пристроєм з використанням заземлювача, який відрізняється від стандартного заземлення, є пристрій захисту від індукованого високочастотною лінією електропередачі змінного струму (ТУ 3435-005-93719333-2010).

Однак дані методи розроблені для захисту лише металевих деталей конструкцій або для забезпечення безпеки людини. Також всі зазначені методи захисту від електрокорозії, що викликана впливом змінного струму, розроблені за аналогією з методами захисту від електрокорозії від постійного струму та не враховують дійсний механізм корозійного руйнування неметалевих деталей конструкції.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Розроблення заходів із захисту від електрокорозії змінним струмом витоку і високочастотної напруги бетонних, залізобетонних і кам'яних інженерних споруд залізниць на основі фундаментальних положень колоїдної хімії та фізико-хімічної механіки.

**Основна частина дослідження.** У роботі [19] досліджено на основі уявлень про електроповерхневі явища в дисперсних системах дійсний механізм електрокорозії бетону залізобетонних конструкцій в умовах впливу змінного струму витоку. Електрокорозійне руйнування розчину й бетону змінним струмом витоку відбувається за рахунок електроміграційного й дифузійного перенесення іонів, що супроводжує вилуговування цементного каменю. Так само відбувається

електрокорозійне руйнування сталеві арматури – за рахунок винесення за межі захисного шару бетону катіонів заліза  $Fe^{2+}$ , що супроводжується винесенням з арматури вивільнюваних електронів.

Результати цих досліджень надали можливість розробити ефективні заходи та конструктивні рішення для захисту споруд від електрокорозії, що викликана дією змінного струму витоку.

**Захист від електрокорозії за допомогою суцільного сталевих екрана з глибинним заземлювачем.** Конструкція захисту сталеві прогонової будови від електрокорозії наведена на рис. 1. Захист здійснюється за допомогою заземленого суцільного сталевих екрана та захисту залізобетонної прогонової будови за допомогою антикорозійного захисного покриття.

Відповідно до цієї схеми сталевий лист-екран закріплюється між поверхнею нижнього поясу прогонової будови та контактним дротом і з'єднується з глибинним заземлювачем. Для підвищення корозійної стійкості як екран на поверхні бетону може використовуватися лист гарячого цинкування з заземленням.

**Захист конструкцій від електрокорозії за допомогою сітчастих екранів понизу опор із глибинним заземленням.** Розроблено конструкцію екрануючих поясів понизу опор із глибинним заземленням. Як екрани можна використовувати сталеві листи, гаряче цинкування, сітчасті екрани.

Сітчасті екрани мають значно меншу вагу, зручні у виготовленні та експлуатації порівняно зі сталевими листовими екранами.

Як екран найбільшу ефективність має мідна сітка, за роботою [20], з чарунками  $0,55 \times 0,56$  мм, шириною 1000 мм, діаметром дроту 0,15 мм. Заземлення з'єднується з екраном, екран обмотується навколо опори поверх шару антикорозійного захисного покриття і закріплюється будь-яким способом. Зверху екран укривається другим шаром антикорозійного захисного покриття.

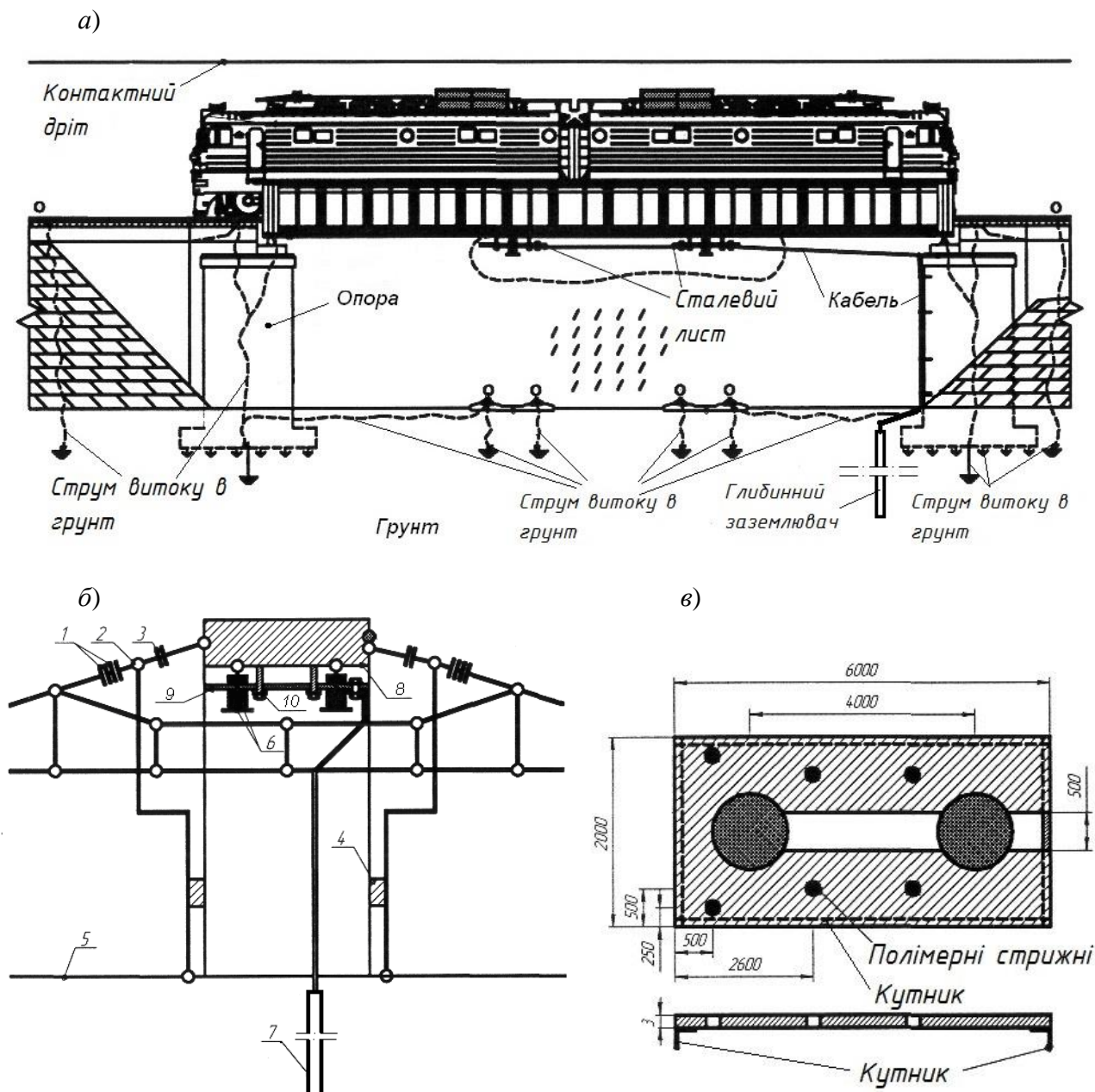


Рис. 1. Конструкція захисного сталевих екрана над контактним дротом із глибинним заземлювачем:

*a* – загальний вигляд; *б* – схема закріплення екрана і його з’єднання з глибинним заземлювачем; *в* – конструкція сталевих екрана; 1 – ізолятори контактної мережі; 2 – нейтральна вставка; 3 – додаткові ізолятори; 4 – ізолюючі прокладки; 5 – рейки; 6 – відбійники контактної мережі; 7 – глибинний заземлювач; 8 – прогонова будова; 9 – сталевий лист; 10 – полімерні стрижні-анкери

Заземлювач складається з обміднених стрижнів, виготовлених із круглої сталі, покритої електролітичним способом міддю (чистотою 99,9 %) шаром товщиною

0,25 мм. Покриття гарантує високу корозійну стійкість і термін служби стрижня в ґрунті не менш ніж 40 років. Мідне покриття стрижнів має високу



адгезію та пластичність, що дозволяє їх занурювати в ґрунт без порушення цілісності та відшарування мідного шару. Стрижні мають високу міцність. Їх занурюють на глибину до 30 м. Вони виготовляються довжиною 1,2 і 1,5 м; між собою з'єднуються за допомогою латунних різьбових муфт.

Для монтажу обміднених стрижнів використовується електромолоток з типом патрона SDS-Max. Для передачі ударних навантажень від електромолотка, що занурює заземлювач, використовується головка,

що приєднується через муфту до верхнього стрижня. На першій зі стрижнів, що занурюють, навіртається сталевий наконечник.

**Захист конструкцій від електрокорозії змінним струмом за допомогою рідкоскляних екранів із глибинним заземленням.** Розроблено конструкцію рідкоскляного екрана з глибинним заземленням, що ізолює фундамент опори-стійки шляхопроводу від стикання з бетоном катіонів  $Ca^{2+}$  і продуктів електрокорозії, розчинення цементного каменю в бетоні. На рис. 2 надана схема такого екрана.

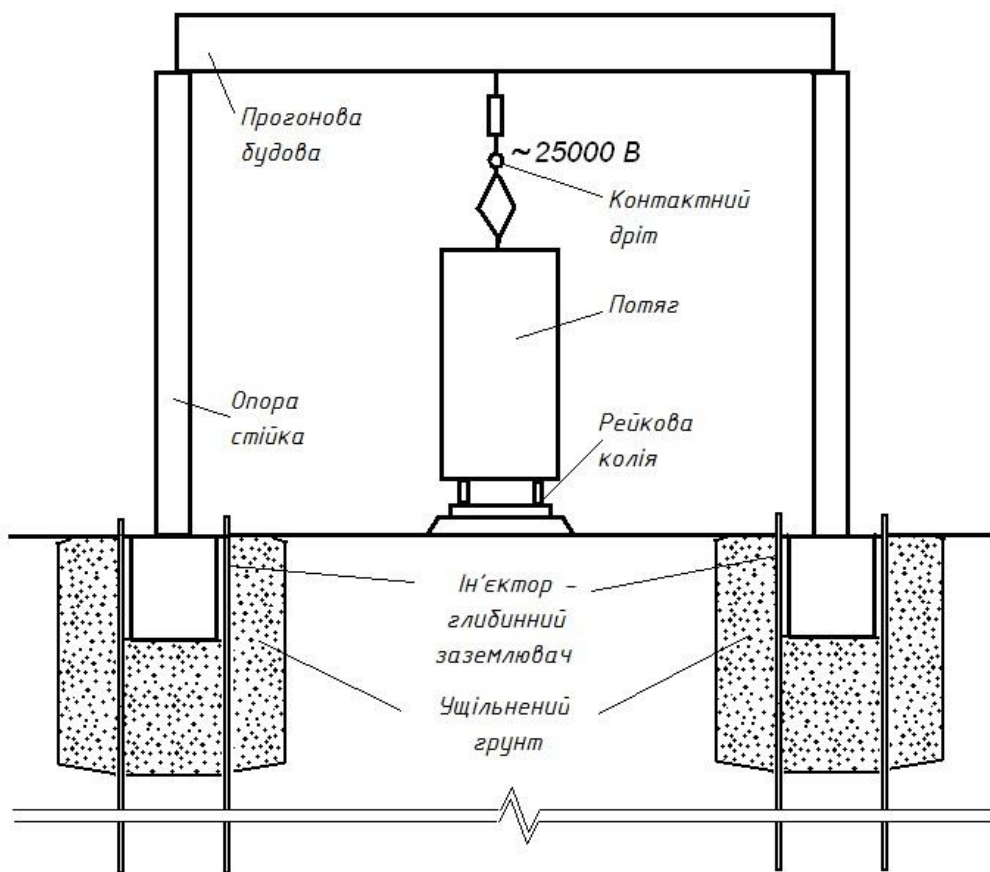


Рис. 2. Захисний рідкоскляний екран від електрокорозії конструкцій шляхопроводу під впливом змінної напруги в контактному дроті

Рідкоскляна композиція, що розроблена в УкрДАЗТ [21, 22], складається зі звичайного рідкого скла, у яке вводиться добавка типу С-3 у кількості 9 %, і використовується в якості отверджувача

кремнефтористоводнева кислота. Вони забезпечують високу проникну здатність (у чотири-п'ять разів вище звичайного рідкого скла), поліпшені гідравлічні властивості,

водостійкість і досить високу міцність композиції.

Для нагнітання використовують ін'єктор (трубу з отворами та глухі ланки). Нагнітання виконуються по периметру фундаменту майже впритул до нього з кроком 2 м. На кінці ін'єктора встановлюється загострений наконечник, а на верхню ланку – наголовник. Всі елементи з'єднуються на різьбі за допомогою з'єднуючих муфт.

Нагнітання виконують за допомогою ручного розчинонасоса індивідуального виготовлення або виробничого виготовлення типу СО-16А. Продуктивність розчинонасоса індивідуального виготовлення вище майже вдвічі, інші технічні характеристики практично такі самі.

Сталева труба-ін'єктор після закінчення нагнітання заглиблюється далі в ґрунт із метою її використання в якості глибинного заземлювача. Добивання здійснюється до рівня ґрунтових вод, якщо вони розташовані недалеко, або залежно від необхідної довжини цього заземлювача.

В умовах, коли починається електрокорозія бетону та винесення з нього під впливом змінного струму витоку катіонів  $\text{Ca}^{2+}$  і аніонів  $\text{OH}^-$ , непроникність композиції для струму та води значно підвищиться. Це обумовлено тим, що капіляри в рідкоскляній композиції мають негативний електроповерхневий потенціал,

що забезпечує їхню непроникність для катіонів  $\text{Ca}^{2+}$ , а при їхньому потраплянні в композицію додатково збільшує міцність, водостійкість і непроникність екрана.

**Висновки.** Розроблено заходи та конструктивні рішення з захисту бетонних, залізобетонних і кам'яних інженерних споруд залізниць від електрокорозії, що викликана змінною високовольтною напругою і струмами витоку: суцільний сталевий екран із глибинним заземлювачем; сітчасті екрани понизу опор із глибинним заземленням; рідкоскляні екрани із глибинним заземленням. Ефективність запропонованих заходів підтверджується довготривалими експлуатаційними випробуваннями. Розроблені конструктивні рішення використані при капітальному ремонті залізничних об'єктів, що знаходяться в зоні впливу змінних струмів витоку та високовольтної напруги – водопропускних труб, мостів і шляхопроводів. Це призвело до зниження величини струмів витоку на конструкціях – визначального фактора виникнення електрокорозії. Спостереження за об'єктами реконструкції проводилось не менше 10 років, за цей час не виявлено пошкоджень конструкцій за рахунок електрокорозії. Ефективність наведених заходів обумовлена врахуванням дійсного механізму руйнування сталевих арматур та бетону конструкцій.

### Список використаних джерел

1. Barlo, Thomas J. Stray Current Corrosion in Electrified Rail Systems – Final Report [Електронний ресурс] / Thomas J. Barlo, Alan D. Zdunek // May, 1995. – Режим доступу : [http://www.iti.northwestern.edu/publications/barlo\\_zdunek/Barlo\\_and\\_Zdunek-1995-Stray%20Current%20Corrosion%20in%20Electrified%20Rail%20Systems.pdf](http://www.iti.northwestern.edu/publications/barlo_zdunek/Barlo_and_Zdunek-1995-Stray%20Current%20Corrosion%20in%20Electrified%20Rail%20Systems.pdf).
2. Chen, Zhipei. A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure [Text] / Zhipei Chen, Dessi Koleva, Klaas van Breugel // Corrosion Reviews. – 2017. – Vol. 5(6). – P. 397-423.
3. Bertolini, Luca. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current [Text] / Luca Bertolini, Maddalena Carsana, Pietro Pedferri // Corrosion Science. – 2007. – Vol. 49(3). – P. 1056-1068.

4. Goidanich, Sara. Influence of alternating current on metals corrosion: Ph.D. Thesis in Materials Engineering [Text] / Sara Goidanich. – Politecnico di Milano, 2002-2005. – 168 p.
5. Теоретические предпосылки защиты бетонных, железобетонных и каменных конструкций от переменных токов утечки [Текст] / А. А. Плугин, А. А. Дудин, Ал. А. Плугин, А. Н. Плугин // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2008. – Вип. 47. – С. 179–184.
6. Исследование влияния токов утечки и блуждающих токов на здания и сооружения, расположенные возле электрифицированных железнодорожных путей [Текст] / А. Н. Плугин, Ал.А. Плугин, А.А. Дудин [и др.] // Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. тр. – Харьков, 2009. – Вып. 40 (Тематический выпуск «Химия, технология и экология»). – С. 88–104.
7. Исследование влияния переменного электрического поля в бетоне на его электрокоррозию [Текст] / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, А. А. Дудин [и др.] // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2010. – Вип. 43. – С. 517–524.
8. Дудін, О. А. Дослідження руйнівних факторів на будівлі та споруди станційних комплексів залізниць [Текст] / О. А. Дудін, Є. О. Мовчан, О. О. Султанова // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 103. – С. 228–235.
9. Riskin, Joseph. Electrocorrosion and Protection of Metals General. Approach with Particular Consideration to Electrochemical Plants [Text] / Joseph Riskin. – Elsevier Science, 2009. – 264 p.
10. Bohnes, H. Handbook of Cathodic Corrosion Protection [Text] / W. von Baeckmann, H. Bohnes, W. Schwenk and etc. – Gulf Professional Publishing, 1997. – 568 p.
11. ВБН В.2.3-3-2009. Відомчі будівельні норми України. Споруди транспорту. Контактна мережа. Норми проектування [Текст] : затв. та надано чинності М-вом трансп. та зв'язку України від 04.08.2009. Зі скасуванням в Україні ВСН 141-980 / М-во транспорту та зв'язку України, Держадміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця. – К. : Поліграфсервіс, 2009. – 186 с.
12. ЦЭ 518. Инструкция по защите железнодорожных подземных сооружений от коррозии блуждающими токами [Текст] / МПС РФ. – М., 1997. – 57 с.
13. ЦЕ-0019. Вказівки з технічного обслуговування та ремонту опорних конструкцій контактної мережі [Текст] : затв. Наказом Укрзалізниці 15.08.2007. No 405-Ц / Міністерство транспорту та зв'язку України. – К., 2007. – 132 с.
14. ДСТУ 4219-2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. Національний стандарт України [Текст] : чинний від 2003.12.01. – К., 2003. – 72 с.
15. Kioupiis, N. Study of the effect of AC-Interference and AC-Mitigation on the Cathodic Protection of a Gas Pipeline [Text] / N. Kioupiis, N. Kouloumbi, G. Batis, P. Asteridis // Conference: 6th CeoCor International Congress. – May, 2003. – 16 p.
16. Ding, Qingmiao. Experimental Study on the Influence of AC Stray Current on the Cathodic Protection of Buried Pipe [Text] / Qingmiao Ding, Yueming Fan // International Journal of Corrosion. – Vol. 2016. – Article ID 5615392. – 8 p.
17. Brelsford, Clay. Mitigating AC Corrosion on Cathodically Protected Pipelines [Text] / Clay Brelsford // Pipeline & Gas Journal. – Oildom Publishing, 2015. – 3p.
18. Далека, В. Х. Електропостачання електричного транспорту [Текст] : навч. посібник / В. Х. Далека, В. К. Нем, В. І. Скуріхін. – Харків: Харківська національна академія міського господарства, 2012. – 169 с.
19. Дудін, О. А. Механізм впливу змінного струму витоку й високовольтної напруги на обводнені бетонні, залізобетонні й кам'яні споруди [Текст] : дис... канд. техн. наук: 05.23.05 / Олексій Аркадійович Дудін. – Харків : УкрДАЗТ, 2012. – 274 с.

20. ГОСТ 6613-86. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками [Текст] : Технические условия. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2006. – 26 с.

21. Рідкоскляна композиція [Текст] : Пат.87795 UA; МПК C04B28/26 E01C21/00 / А. А. Плугін, А. М. Плугін, О. С. Герасименко, Л. В. Трикоз, С. В. Мірошніченко, О. А. Калінін, Д. А. Плугін, О. А. Дудін, В. А. Лютий, О. А. Плугін. – Заявл. 07.10.2008; № a200811931. – Опубл. 10.08.2009; Бюл. №15. – 3 с.

22. Герасименко, О. С. Увеличение проникающей способности и прочности жидкого стекла [Текст] : дисс... канд. техн. наук: 05.23.05 / Олег Степанович Герасименко. – Харьков : УкрГАЗТ, 2008. – 231 с.

---

Борзяк Ольга Сергіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. +38(057)7301063. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Дудін Олексій Аркадійович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. +38(057)7301991. E-mail: aadudin@ukr.net.

Куценко Максим Юрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. +38(057)7301991. E-mail: maksimus84@meta.ua.

Познякова Вікторія Георгіївна, викладач спеціальних дисциплін «Політехнічний коледж ДВНЗ «Криворізький національний університет», Тел. +38(096)6284418. E-mail: pkknu@ukr.net.

Борзяк Ольга Сергеевна, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных материалов, конструкций и сооружений Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. +38 (057) 7301063. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Дудин Алексей Аркадьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. +38 (057) 7301991. E-mail: aadudin@ukr.net.

Куценко Максим Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры станций и узлов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. +38 (057) 7301991. E-mail: maksimus84@meta.ua.

Позняков Виктория Георгиевна, преподаватель специальных дисциплин «Политехнический колледж ГВУЗ «Криворожский национальный университет». Тел. +38 (096) 6284418. E-mail: pkknu@ukr.net.

Borziak Olga S., PhD (Tech.), associate professor, Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. Ph. +38(057)7301063. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Dudin Oleksii A., PhD (Tech.), associate professor, Department of Track and Track Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. Ph. (+38057)7301991. E-mail: aadudin@ukr.net.

Kutsenko Maksym Y., PhD (Tech.), associate professor, Department of Railway stations and Junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. Ph. +38(057)7301991. E-mail: maksimus84@meta.ua.

Poznyakova Victoria G., teacher special disciplines «Polytechnic College State Higher Educational Institution «Kryvyi Rih National University». Ph. +38(096)6284418. E-mail: pkknu@ukr.net.

Статтю прийнято 12.12.2018 р.

УДК 667.6

**ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА ВОГНЕЗАХИСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНО-ДИСПЕРСІЙНИХ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ**

Асп. Д. В. Демідов

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ОГНЕЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНО-ДИСПЕРСИОННЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Асп. Д. В. Демидов

**STUDYING THE EFFECT OF MINERAL FILLERS ON THE FIRE-RELEASE CHARACTERISTICS OF WATER-DISPERSION PAINT-AND-PAINT COATINGS**

Postgraduate student D. Demidov

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.182.2018.159768>

---

*Розглянуто можливість підвищення вогнезахисної ефективності водно-дисперсійних акрил-стирольних лакофарбових покриттів за допомогою мінеральних дисперсних наповнювачів. У якості наповнювачів застосовували поліфосфат амонію і порожнисті зольні алюмосилікатні мікросфери. Під час проведених досліджень за первинною оцінкою вогнезахисної ефективності розроблених покриттів показано, що введення алюмосилікатних мікросфер дозволяє підвищити міцність пінококсового шару при збереженні достатнього коефіцієнта спучування і перевести розроблені матеріали з групи горючих у групу важкогорючих полімерних матеріалів.*

**Ключові слова:** водно-дисперсійні лакофарбові покриття, вогнезахисна ефективність, кисневий індекс, антипірен.

*Рассмотрена возможность повышения огнезащитной эффективности водно-дисперсионных акрил-стирольных лакокрасочных покрытий при помощи минеральных дисперсных наполнителей. В качестве наполнителей применяли полифосфат аммония и полые зольные алюмосиликатные микросферы. В ходе проведенных исследований по первичной оценке огнезащитной эффективности разработанных покрытий показано, что введение алюмосиликатных микросфер позволяет повысить прочность пенококсового слоя при сохранении достаточного коэффициента вспучивания и перевести разработанные материалы из группы горючих в группу трудногорючих полимерных материалов.*

**Ключевые слова:** водно-дисперсионные лакокрасочные покрытия, огнезащитная эффективность, кислородный индекс, антипирен.

*Development paint and varnish compositions to protect metal and non-metallic surfaces is one of the priorities of fire safety in the operation and repair of rolling stock, since the cost of measures aimed at eliminating the effects of fires is many times higher than the cost of their prevention.*

*The possibility of increasing the fire retardant effectiveness of water-dispersion acrylic-styrene paint and varnish coatings with the help of dispersed mineral fillers is considered. Ammonium polyphosphate and hollow ash aluminosilicate microspheres were used as fillers. The*

assessment of the flame retardant properties of the resulting coatings was evaluated by the «fire tube» method, the characteristics of the coke expanded layer and the oxygen index.

Organic-based protective coatings provide anti-corrosion functions, but in most cases have negligible flame retardant effectiveness. However, such coatings provide more opportunities, so by increasing their thickness, you can increase the fire protection of products, contribute to the localization of fire development, a significant slowdown in the rate of flame propagation and allows you to connect active extinguishing agents. The flame retardant efficiency of the compositions, which swell up depends largely not only on the volume and density of the coke expansion layer, which is formed during combustion, but also on its resistance to burnout and mechanical destruction, adhesion to the protected surface after expansion.

In the course of the studies on the primary assessment of the flame retardant efficiency of the developed coatings, it was shown that the introduction of aluminosilicate microspheres makes it possible to increase the strength of the foam coke layer while maintaining a sufficient expansion coefficient and transfer the developed materials from the group of combustible to the group of combustible polymeric materials.

**Keywords:** water dispersion paint coatings, flame retardant efficiency, oxygen index, flame retardant.

**Вступ.** Водно-дисперсійні лакофарбові покриття широко використовуються для отримання захисно-декоративних покриттів на неметалевих поверхнях, проте останнім часом вони все більше використовуються як у побуті, так і в інших галузях промисловості, на транспорті і в будівництві для захисту металу і бетону від дії корозії та підвищених температур [1-3].

Розроблення вогнезахисних покриттів для захисту металевих і неметалевих поверхонь є одним із пріоритетних напрямків пожежної безпеки при експлуатації та ремонті рухомого складу, оскільки вартість заходів, спрямованих на усунення наслідків пожеж, у багато разів перевищує витрати на їхню профілактику. У якості вогнезахисних покриттів використовують вогнезахисні просочення, фарби, лаки, обмазки, штукатурки і плівкові покриття. Різні способи вогнезахисту мають свої переваги і недоліки. Відповідно до відмінності в їхніх експлуатаційних властивостях вони мають різні сфери застосування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Склади на неорганічних зв'язуючих самі по собі належать до негорючих матеріалів і в загальному випадку є ефективними вогнезахисними

складами, які застосовуються в транспортній промисловості. Однак вони в більшості випадків не забезпечують антикорозійну функцію в процесі експлуатації через низьку механічну міцність при вібрації та ударних навантаженнях. Також недоліком неорганічних покриттів є їхні великі витрати порівняно з органічними покриттями при досягненні однакового рівня вогнезахисної ефективності [4, 5].

Захисні покриття на органічній основі, навпаки, забезпечують антикорозійні функції, але в більшості випадків мають незначну вогнезахисну ефективність. Вогнезахисні покриття на органічних зв'язуючих забезпечують більш широкі можливості. Так, за рахунок збільшення їхньої товщини можна підвищити вогнестійкість виробів, що сприяє локалізації розвитку пожежі, значному уповільненню швидкості поширення полум'я і дозволяє підключити активні засоби гасіння [6-8].

Тому при вирішенні проблеми підвищення вогнезахисних властивостей покриттів на органічній основі, а саме екологічно доцільних водно-дисперсійних покриттів, одночасно необхідно вирішити такі проблеми: захист виробів у транспортній промисловості від дії підвищених

температур, агресивних чинників середовища у процесі експлуатації, а також підвищення ефективності самого вогнезахисного складу.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Підвищення ефективності вогнезахисного складу на основі акрил-стирольної водної дисперсії шляхом раціонального поєднання діючих компонентів: органічного зв'язуючого і мінеральних наповнювачів, таких як поліфосфат амонію і порожнистих зольних алюмосилікатних мікросфер.

**Основна частина дослідження.** Основні принципи побудови рецептур вогнезахисних покриттів на основі органічних водних дисперсій аналогічні рецептурами традиційних лакофарбових матеріалів: плівкоутворювач, наповнювачі, пігменти (якщо необхідно), реологічні добавки, сикативи (якщо необхідно), технологічні добавки. Головна відмінність – наявність антипірену, що відповідає за процес утворення пінококсу, який виступає в ролі фізичного бар'єру, знижуючи тепло-і масоперенесення від газової до конденсованої фази.

Використовуються такі види антипіренів: галоген-, фосфор-, бор- і азотовмісні сполуки; оксиди, солі і комплексні сполуки різних металів; органічні сполуки, до складу яких входить кілька гетероатомів. Антипірени можуть вводитися в полімерне органічне зв'язуюче як у вигляді індивідуальних речовин, так і по кілька сполук одночасно.

На сьогодні більше 15 % всіх антипіренів, які підвищують ефективність вогнезахисних складів, складають солі і ефіри фосфорних кислот. Дію фосфору та його сполук у якості антипіренів пов'язують з таким чинником, як специфічний вплив фосфорних сполук на процеси, що протікають у конденсованій фазі при горінні полімерів. Фосфорні антипірени або продукти їхнього перетворення служать агентами та свого роду каталізаторами реакцій відщеплення

заступників у макромолекулярному ланцюзі, циклізації та інших реакцій полімерів. Хімічні перетворення полімерів при цьому спрямовано на збільшення виходу нелеткого коксового залишку та зменшення горючих продуктів піролізу; утворення поверхневого склоподібного або в'язкого розплавленого шару поліметафосфорної кислоти. Цей шар служить фізичним бар'єром для перенесення тепла від полум'я до полімеру і дифузії горючих продуктів у зону горіння, а також впливає на гетерогенне окиснення карбонізованих продуктів піролізу полімерів [9, 10].

У даній роботі представлено результати первинного оцінювання вогнезахисних властивостей розроблених лакофарбових покриттів на основі водно-дисперсійного акрил-стирольного сополімеру, наповненого поліфосфатом амонію (ПФА) і порожнистими зольними алюмосилікатними мікросферами (МС) [11-13]. Основною характеристикою ПФА для вогнезахисного складу є вміст азоту і фосфору, які повинні знаходитися в межах 14-15 % азоту і не менше 70 % фосфору відповідно. Порожністі зольні алюмосилікатні мікросфери являють собою дрібнодисперсні порошки, які складаються з тонкостінних (0,25-10 мкм) алюмосилікатних, натрійкалій-боросилікатних частинок сферичної форми діаметром 10-500 мкм і насипною щільністю до 0,2 г/см<sup>3</sup>.

Вогнезахисні властивості отриманих покриттів оцінювали методом «вогнева труба», характеристиками коксового спученого шару (коефіцієнт спучення та механічна міцність) і кисневим індексом.

Метод «вогнева труба» широко використовується в дослідницьких цілях. Сутність методу полягає у визначенні втрати маси зразками деревини, обробленими випробовуваними покриттями при вогневому випробуванні в умовах, сприятливих акумуляції тепла, і дозволяє визначити групу вогнезахисної ефективності: для I групи втрати маси після спалювання повинні складати не більше

9 %, для II – від 9 до 25 %, якщо втрати маси зразка більше 25 %, то покриття вважається горючим. Для випробовувань за методом «вогнева труба» були підготовлені зразки соснової деревини розміром 150×60×30 мм, які були оброблені досліджуваними покриттями товщиною 1 мм залежно від вмісту мінеральних наповнювачів.

Вогнезахисна ефективність складів, що спучуються, багато в чому залежить не тільки від об'єму та щільності коксового спученого шару, який утворюється при горінні, а й від його стійкості до вигорання і механічного руйнування, адгезії до поверхні, що захищається після спучування. Тому було визначено коефіцієнт спучення. На металеві пластини розміром 100×100 мм попередньо наносили розроблені склади товщиною не більше 1 мм, поміщали в муфельну піч і витримували протягом 5 хв при температурі 600±5 °С. Механічну міцність спучених складів ( $F$ , г/см<sup>2</sup>) оцінювали методом penetрації поверхні пінококсу індентором діаметром 5 мм [14-17].

Для порівняльної оцінки горючості розроблених покриттів у певних контро-

льованих умовах визначали кисневий індекс (КІ) відповідно до ДСТУ EN ISO 4589-2:2015. Такий метод можна застосовувати тільки як один з елементів оцінки пожежної небезпеки покриттів.

Результати випробовувань коефіцієнта спучування ( $K_c$ ), механічної міцності ( $F$ , г/см<sup>2</sup>), втрати маси після випробовування методом «вогнева труба» ( $\Delta m$ , %) і кисневий індекс (КІ, %) отриманих покриттів залежно від ступеня наповнення мікросферами (МС) і поліфосфатом амонію (ПФА) наведено на рис. 1.

З рис. 1 видно, що на вогнезахисні властивості суттєвий вплив має антипірен ПФА. При введенні наповнювача МС в кількості 40 мас. % спостерігається незначне збільшення КІ до 24 % за рахунок зменшення частки акрил-стирольного зв'язуючого і збільшення частки негорючого мінерального наповнювача, що дозволяє віднести такі матеріали до групи «важкозаймистих» матеріалів, які не підтримують горіння в атмосфері повітря (КІ>21 %), за рахунок зменшення концентрації горючих газів у зоні горіння.

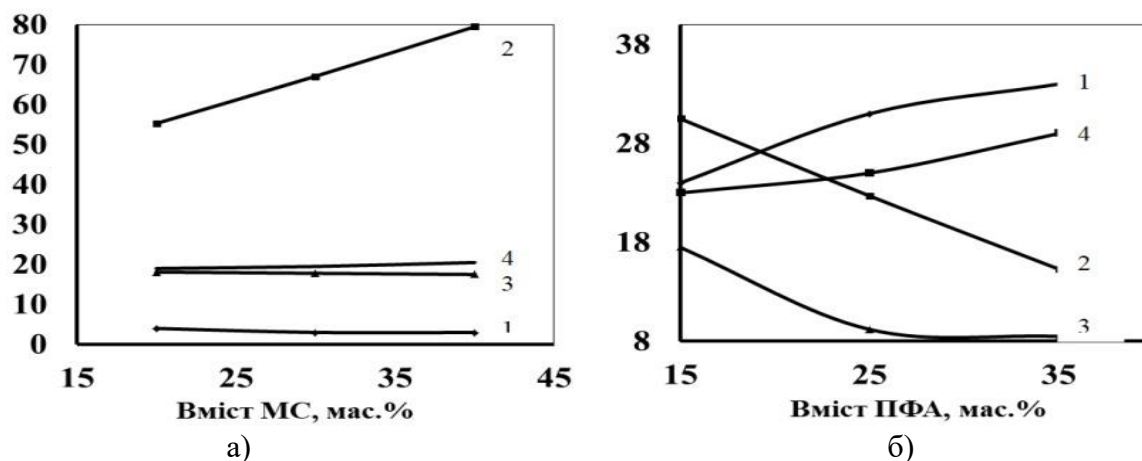


Рис. 1. Оцінка вогнезахисних властивостей залежно від ступеня наповнення МС (а) та ПФА (б): 1 –  $K_c$ , 2 –  $F$ , 3 – втрати маси, 4 – КІ

При введенні антипірену ПФА КІ підвищується до 30 %, що дозволяє пере-

вести розроблені матеріали з групи горючих у групу важкогорючих і самогасаль-



них ( $KI > 27\%$ ) полімерних матеріалів, що є основним критерієм їхньої негорючості.

Далі на рис. 2 представлені графічні залежності отриманих покриттів залежно від спільного впливу мікросфер (МС) і поліфосфату амонію (ПФА), коефіцієнта спучування ( $K_c$ ), механічної міцності ( $F$ ,  $г/см^2$ ), втрат маси після випробовування методом «вогнева труба» ( $\Delta m$ , %) і величини кисневого індексу ( $KI$ , %).

Як видно з наведених даних рис. 2, а введення мікросфер призводить до

зниження коефіцієнта спучування: за рахунок збільшення питомої щільності утворюється пінококс, у структуру якого впроваджуються негорючі алюмосилікатні мікросфери, причому при збільшенні вмісту мікросфер зниження коефіцієнта спучування відбувається непропорційно, що, на перший погляд, пов'язано з певною граничною кількістю впроваджуваних у структуру пінококсу мікросфер, як наслідок, надлишок мікросфер не бере участі в утворенні пінококсового шару.

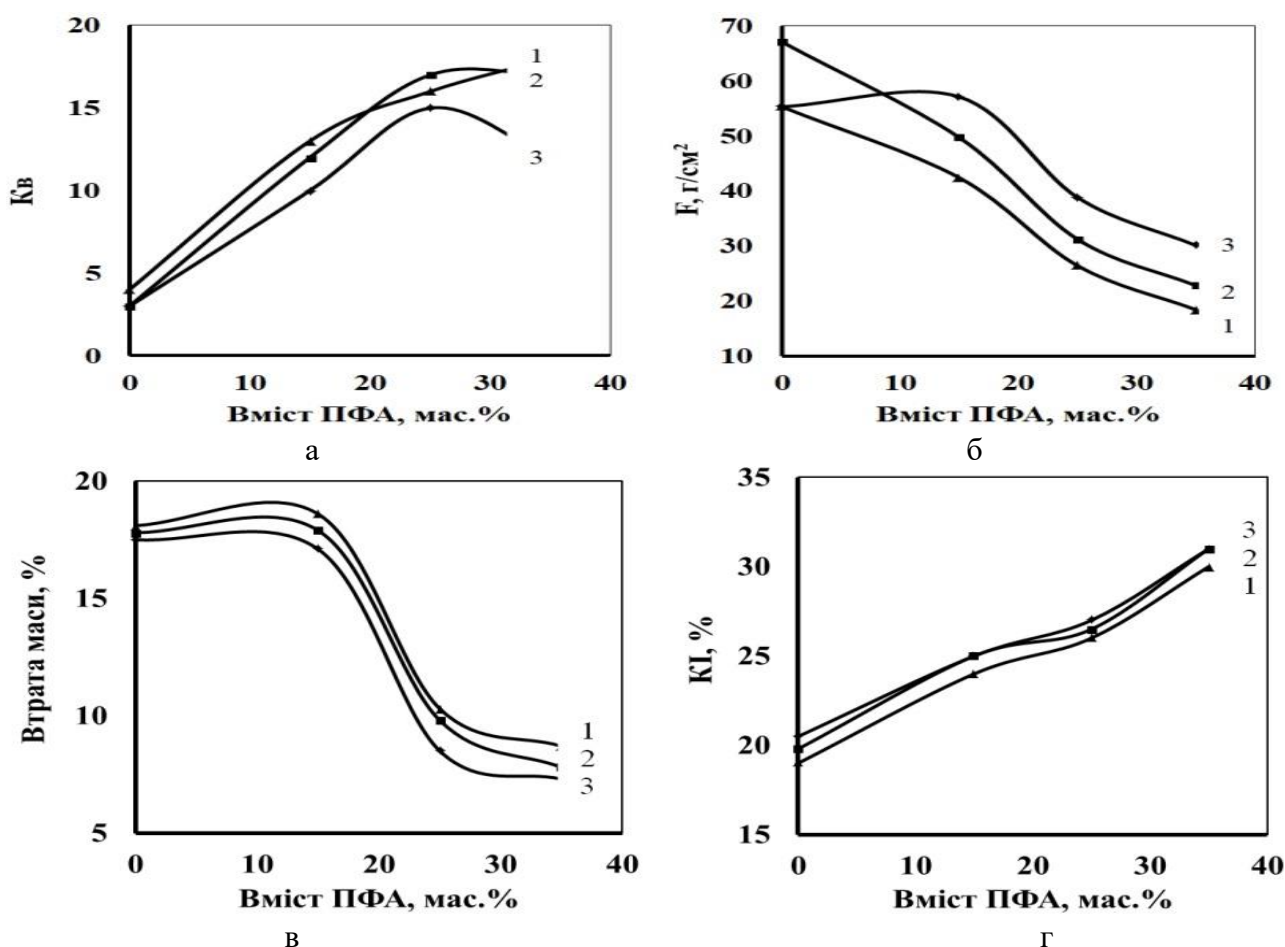


Рис. 2. Оцінка вогнезахисних властивостей залежно від ступеня наповнення МС:  
1 – 20 мас. %, 2 – 30 мас. %, 3 – 40 мас. %

На рис. 2,б показано, що введення мікросфер дозволило підвищити міцність пінококсу (до  $K_c = 57$  разів) за рахунок впровадження в його структуру досить

міцних агрегатів алюмосилікатних мікросфер.

Дослідження втрат маси наведено на рис. 2,в. Як видно з отриманих залежностей

зі збільшенням частки ПФА і МС втрати маси знижуються (до  $\Delta m = 7,3\%$ ), що досягається при максимальному вмісті ПФА і МС, що обумовлено збільшенням частки негорючих мінеральних наповнювачів.

Зміну кисневого індексу від вмісту ПФА наведено на рис. 2, г. З наведених залежностей видно, що при спільному використанні антипірену (ПФА) і алюмосилікатних мікросфер відбувається збільшення КІ на 2-3% за рахунок зменшення частки продуктів горіння акрил-стирольного зв'язуючого і збільшення частки негорючого мінерального наповнювача, а так само за рахунок зниження міграції горючих газів у зону горіння в результаті зменшення пористості пінококсового шару

**Висновки.** У результаті проведених досліджень вогнезахисних властивостей отриманих покриттів від вмісту і типу наповнювачів показано, що введення поліфосфату амонію дозволяє перевести

акрил-стирольні покриття в групу важкогорючих матеріалів (КІ до 24-29%), які характеризуються високим коефіцієнтом спучування ( $K_c$  до 35 разів), але недостатньою міцністю пінококсу (до  $F = 15-30 \text{ г/см}^2$ ), що в умовах реальної пожежі не дозволяє утворювати міцний пінококсовий шар і, як наслідок, погіршує вогнезахисні властивості утвореного пінококсового шару.

Під час досліджень вогнезахисних характеристик водно-дисперсійних лакофарбових покриттів за рахунок мінеральних наповнювачів з'ясовано, що введення алюмосилікатних мікросфер дозволяє в 1,5-2 рази підвищити міцність пінококсового шару (до  $F = 30,5-57,1 \text{ г/см}^2$ ) при збереженні достатнього коефіцієнта спучування (до  $K_c = 18$  разів) за рахунок впровадження мікросфер у структуру пінококсового шару при збільшенні кисневого індексу ( $KI = 25-31\%$ ) і перевести розроблені матеріали з групи горючих у групу важкогорючих полімерних матеріалів.

### Список використаних джерел

1. Лобковский, В. Водно-дисперсионные краски для защиты металла и бетона от коррозии [Текст] / В. Лобковский // Промышленная окраска. – 2016. – № 4. – С. 28-31.
2. Казакова, Е. Е. Водно-дисперсионные акриловые лакокрасочные материалы строительного назначения [Текст] / Е. Е. Казакова, О. Н. Скороходова. – М. : ООО «Пэйнт-Медиа», 2003. – 136 с.
3. The transition to the replacement of organic solvents by aqueous solvents is supported by the government and association of all countries [Text] // Chemistry of Ukraine. – 2012. – Vol. 70. – 53 p.
4. Балакин, В. М. Первичная оценка огнезащитных свойств вспучивающихся покрытий на основе различных водных дисперсий [Текст] / В. М. Балакин, А. М. Селезнёв, К. В. Белоногов // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. – № 6. – С. 14-18.
5. Беликов, А. С. Применение жидкостекольных композиций в качестве огнезащитных покрытий [Текст] / А. С. Беликов // Вопросы химии и химической технологии. – 2000. – №1. – С. 104-107.
6. Дослідження вогнезахисної ефективності епоксиполімерного покриття «ANTIFIRE» [Текст] / Ю. М. Данченко, Т. М. Обіженко, В. А. Андронов, Н. В. Саєнко // Науковий вісник будівництва. – 2017. – Т. 89. – № 3. – С. 215-223.
7. Саєнко, Н. В. Первичная оценка огнезащитных свойств водно-дисперсионных акриловых покрытий теплоизоляционного назначения [Текст] / Н. В. Саєнко, Д. В. Демидов // Науковий вісник будівництва. – 2016. – Т. 86. – № 4. – С. 154-57.

8. Оценка эффективности применения эпоксидных полимерных композиций для огнезащиты клееной древесины [Текст] / В. А. Андронов, Ю. М. Данченко, Н. В. Саенко [и др.] // Проблемы пожарной безопасности. – 2014. – Вып. 36. – С. 10-16.
9. Влияние антипиренов на показатели пожарной опасности эпоксиполимерных материалов [Текст] / Р. А. Яковлева, Е. Ю. Спирина-Смилка, Ю. В. Попов [и др.] // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. трудов. – 2011. – Вып. 29. – С. 175-181.
10. Визначення міцносних характеристик теплоізолюючого спученого шару вогневібростійких покриттів для протипожежного захисту металевих виробів [Текст] / А. І. Березовський, І. Г. Маладика, Н. В. Саенко, Ю. В. Попов // IV міжнар. наук.-практ. конф. «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». – Черкаси, 2012. – С. 172-177.
11. Rheological properties of aqueous dispersion of styrene acrylate copolymer incorporating hollow microspheres and AEROSIL [Electronic source] / N. Saienko, D. Demidov, Y. Popov, R. Bikov, V. Butskiy // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 230. – 8 p. – <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003017>.
12. Вахитова, Л. Н. Жидкокерамические теплоизоляционные покрытия – новое слово в энергосбережении [Текст] / Л. Н. Вахитова, А. А. Завертатный // F+S: технологии безопасности и противопожарной защиты. – 2010. – № 3 (45). – С. 64-66.
13. Panchenko, I. Thermal insulation coating based on water-based polymer dispersion [Electronic source] / I. Panchenko, M. Akulova, D. Panchenko // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 143. – 7 p. – <http://doi.org/10.1051/mateconf/201814302007>.
14. Березовский, А. И. Определение коэффициента вспучивания и прочностных характеристик вспученного слоя огнезащитных вибростойких покрытий для противопожарной защиты металлических элементов и конструкций [Текст] / А. И. Березовский, И. Г. Маладыка // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2013. – № 1. – С. 59-67.
15. Влияние ко-интеркалированных соединений графита на показатели огнезащитных свойств вспучивающихся огнезащитных композиций [Текст] / Р. А. Яковлева, Е. Ю. Спирина, Ю. В. Попов [и др.] // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХДТУБА, 2010. – Вип. 59. – С. 259-263.
16. Собурь, С. В. Огнезащита материалов и конструкций [Текст]: справочник / С. В. Собурь. – М. : Спецтехника, 2002. – 240 с.
17. Flame retardancy and toughening properties of epoxy composites containing ammonium polyphosphate microcapsules and expanded graphite [Electronic source] / D. He, C. Zhao, H. Gou, Y. Li, D. Xiang // High Performance Polymers. – 2018. – Vol. 30. – Iss. 10. – P. 1247-1259. – <http://doi:10.1177/0954008317747952>.

---

Демидов Дмитро Васильович, аспірант кафедри загальної хімії Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (050) 878-61-71. E-mail: natause@ukr.net. ORCID 0000-0002-9530-3500.

Демидов Дмитрий Васильевич, аспирант кафедры общей химии Харьковского национального университета строительства и архитектуры. Тел.: (050) 878-61-71. E-mail: natause@ukr.net. ORCID 0000-0002-9530-3500.

Dmitriy Demidov, postgraduate student department of general chemistry Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (050) 878-61-71. E-mail: natause@ukr.net. ORCID 0000-0002-9530-3500.

Статтю прийнято 17.12.2018 р.

УДК 691.4:624.1

**ДЕФОРМАТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРУНТОПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТА:  
МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Д-р техн. наук А. А. Плугін, канд. техн. наук С. В. Мірошніченко,  
асп. А. С. Зверєва, інж. І. В. Резніченко

**ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТОПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТА:  
МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Д-р техн. наук А. А. Плугин, канд. техн. наук С. В. Мирошниченко,  
асп. А. С. Зверева, инж. И. В. Резниченко

**DEFINITIVE PROPERTIES OF GROUND-POLYMER COMPOSITE: METHOD OF  
EXPERIMENTAL RESEARCH**

**D. Sc. (Tech.) A. Plugin, PhD (Tech.) S. Miroshnichenko,  
postgraduate student A. Zvierieva, engineer I. Reznichenko**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.182.2018.159929>

---

*Розроблено оригінальний метод дослідження деформативних властивостей ґрунтополімерного композита, утвореного внаслідок ін'єктування у глинистий ґрунт поліуретанового матеріалу SPT<sup>®</sup>. Згідно з цим методом ґрунт поміщують у силову циліндричну ємкість, ущільнюють, закривають силовою кришкою та через ін'єкційну трубку нагнітають у нього матеріал SPT<sup>®</sup>. Після полімеризації матеріалу ґрунтополімерний композит піддають статичним і динамічним випробуванням безпосередньо в ємкості. У результаті випробувань отримують залежності відносної деформації композиту від напруження (від статичного навантаження) і від кількості циклів певного динамічного навантаження та визначають модуль деформації (статичний) у мегапаскалях і запропонований авторами модуль вібрордеформації в розмірності «кількість циклів». Крім деформативних властивостей композита, для оцінювання його довговічності запропоновано визначати втрату маси зразків композита від кількості циклів поперемінного висушування та зволоження і порівнювати її з втратою маси аналогічних матеріалів з відомою довговічністю. Дослідження проводяться для різних показників вологості ґрунту до та після закріплення і для різних величин відносної кількості полімеру у ґрунті (витрати полімеру на одиницю об'єму ґрунту).*

**Ключові слова:** поліуретан, ґрунтополімерний композит, модель, деформативність, випробування.

*Разработан оригинальный метод исследования деформативных особенностей ґрунтополімерного композита, образованного в результате инъєктирования в глинистый ґрунт полиуретанового материала SPT<sup>®</sup>. Согласно этому методу ґрунт помещают в силовую цилиндрическую емкость, уплотняют, закрывают силовой крышкой и через инъєкционную трубку нагнетают в него материал SPT<sup>®</sup>. После полимеризации материала ґрунтополімерний композит подвергают статическим и динамическим испытаниям непосредственно в емкости. В результате испытаний получают зависимости относительной деформации композита от напряжения (от статической нагрузки) и от количества циклов определенного динамической нагрузки и определяют модуль деформации*

(статический) в мегапаскалях и предложенный авторами модуль вибрдеформации в размерности «количество циклов». Кроме деформативных свойств композита, для оценки его долговечности предложено определять потерю массы образцов композита от количества циклов высушивания и увлажнения и сравнивать ее с потерей массы аналогичных материалов с известной долговечностью. Исследования проводятся для разных показателей влажности почвы до и после закрепления и для различных величин относительного количества полимера в почве (расходы полимера на единицу объема грунта).

**Ключевые слова:** полиуретан, грунтополимерный композит, модель, деформативность, испытания.

*The original method of studying the deformation features of the ground-polymer composite formed as a result of injection into the clayey soil of the polyurethane material SPT® has been developed. According to this method, the soil is placed in a power cylindrical container, sealed, closed by a power cover, and injected into it by the SPT® material through the injection tube. The amount of material for injection is determined by the volume of the model and the shape. Injection should be performed at 2 points along the height of the model for dynamic tests (high model) and at 1 point for static tests. A soil with characteristics close to the soils, which were identified in the bases of emergency transport facilities, was selected as a soil for testing. After polymerization of the material, the soil-polymer composite is subjected to static and dynamic tests directly in the container. During static tests, the magnitude of the load and the corresponding readings of the deformations of the soil-polymer composite were fixed. In dynamic tests, the load was constant, and the number of load cycles and the amount of deformation were recorded. As a result of the tests, the dependences of the relative deformation of the composite on the voltage (from the static load) and on the number of cycles of the determined dynamic load are obtained and the deformation module (static) in MPa is determined and the module proposed by the authors of the vibration deformation in the dimension "number of cycles" is determined. In addition to the deformation properties of the composite, it is proposed to determine the weight loss of the composite samples from the number of drying and humidification cycles and to compare it with the loss of mass of similar materials with known durability, to determine its durability. For research on durability, samples were cut out from a primer-polymer composite and subjected to alternate moistening and drying, with fixation of the change in the mass of the sample both in the moistened state and in the dried one. Studies are carried out for different soil moisture indicators before and after fastening, and for different values of the relative amount of polymer in the soil (the cost of a polymer per unit volume of soil).*

**Keywords:** polyurethane, soil-polymer composite, model, deformability, tests.

**Вступ.** Фізико-механічні властивості ґрунтів і несуча здатність основ залежить від характеристик ґрунту і його вологості [1]. У разі виникнення дефектів у несучих конструкціях будівель або споруд у першу чергу слід звертати увагу на несучу здатність основи в конкретний проміжок часу. При погіршенні характеристик ґрунту, незалежно від причин, необхідно передбачити заходи з відновлення несучої здатності основи. Широкого розповсюдження останнім часом набувають ін'єкційні

способи – нагнітання в ґрунти полімерних матеріалів, що тверднуть. При ін'єктуванні можливо закріплення ґрунтів як за рахунок просочення ґрунту, так і за рахунок розриву шарів ґрунту з ущільненням і віджиманням води. Матеріали і технології SPT® підсилюють ґрунти саме за рахунок розриву шарів та ущільнення. При такому способі підсилення ґрунту основи не мають однорідної структури, тому для аналізу їхньої несучої здатності та деформативності потрібно враховувати ці особливості.

**Аналіз останніх досліджень.** Аналіз результатів експлуатації споруд і будівель як власний [2], так й інших дослідників [3-7] показав, що на роботу основ суттєво впливає не тільки статичне навантаження, а й динамічне навантаження та вібрація, характерні для будівель і споруд залізничного транспорту.

Попередніми дослідженнями встановлено, що поліуретановий матеріал у результаті ін'єктування проникає у ґрунт з його розривом на блоки, імовірно, по усадочних тріщинах і їхніх зародках і утворює ґрунтополімерний композит з просторовою стільниковою структурою, яка намагається наблизитись до структури ідеальної піни Уейра-Фелана з суміжних пентагональних додекаедрів, у якій стінки пухирців – полімер, а їх середина – ґрунт. Утворений композит матиме набагато більші, ніж у ґрунту, модуль деформації, водонепроникність. Проте їх визначення стандартними методами через вказану структуру композита неможливе.

Виходячи з викладеного розроблення оригінальної методики дослідження дефор-

мативних властивостей ґрунтополімерного композита є актуальним завданням.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Мета досліджень – розроблення методики експериментальних досліджень деформативних властивостей і показників довговічності ґрунтополімерного композита.

**Основна частина дослідження**

*Моделі ґрунтополімерного композита.* Для вибору ґрунту для моделей ґрунтополімерних композитів було виконано аналіз характеристик ґрунтів основ залізничних споруд і будівель, які зазнавали пошкоджень через виявлені обстеження нерівномірних осідань. Для моделей обрали глинистий ґрунт з характеристиками, узагальненими для пошкоджених у різні роки будівель і споруд (таблиця).

Отже, для виготовлення і дослідження моделей відбирається ґрунт, який за властивостями наближається до суглинка з такими показниками консистенції: границя пластичності  $W_P = 0,2 \div 0,22$ ; границя текучості  $W_L = 0,33 \div 0,35$ ; число пластичності  $I_P = 0,12 \div 0,14$ .

Таблиця

Характеристики ґрунту пошкоджених залізничних споруд

Характеристики шару ґрунту, замокання якого обумовило пошкодження	Значення характеристик ґрунту для пошкоджених об'єктів					
	Водопрopusкна труба на 5 км ділянки Гребениківка-Низи Південної залізниці	Водопрopusкна труба на 6 км ділянки Гребениківка-Низи Південної залізниці	Малий міст на 351 км ділянки Основа-Букіне Південної залізниці	Пост ЕЦ ст. Кагамлицька Південної залізниці	Пост ЕЦ ст. Кислівка Південної залізниці	Середні (узагальнені)
Тип ґрунту	супісок	суглинок	суглинок	суглинок	глина	суглинок
Границя пластичності $W_P$	0,14	0,14	0,24	0,2	0,33	0,21
Границя текучості $W_L$	0,19	0,25	0,4	0,24	0,63	0,34
Число пластичності $I_P$	0,05	0,11	0,16	0,04	0,3	0,13

Для проведення статичних і динамічних випробувань розроблено різні моделі, що враховують структуру ґрунтополімерного композита і можливості випробувального обладнання. Запропоновані циліндричні моделі глинистого ґрунту основи об'ємом 100 л діаметром 600 мм для статичних випробувань – 5 шт., об'ємом 100 л діаметром 400 мм для динамічних випробувань – 5 шт.

Для виготовлення моделей ґрунт доводиться до консистенції, що відповідає м'якопластичному стану з вологістю  $W = 0,30$  (30%). Ємкості заповнюються підготовленим ґрунтом шарами товщиною 50-70 мм, кожен з яких трамбується 20 ударами металевої трамбовки масою 10 кг з круглою ударною поверхнею діаметром 150 мм.

У трьох моделях об'ємом 100 л діаметром 600 мм для статичних випробувань і у трьох моделях об'ємом 100 л діаметром 400 мм для динамічних

випробувань у ґрунт ін'єктується матеріал SPT® за технологією виробника. По дві ємкості залишаються як контрольні зразки.

*Методика статичних випробувань ґрунтополімерного композита.* Для статичних випробувань моделей ґрунту улаштовується порталне пристосування, яке дозволяє здійснювати статичне навантаження зверху (рис. 1). Ємкість з моделлю ґрунту об'ємом 100 л діаметром 600 мм встановлюється в порталне пристосування, на ґрунт по осі моделі накладається квадратний металевий штамп з розміром сторін 200 мм. Між штампом і верхньою балкою порталу послідовно встановлюються гідравлічний домкрат 4 т і динамометр 3 т. На ємкості закріплюються чотири штативи, у яких затискаються чотири індикатори лінійного переміщення годинникового типу таким чином, щоб щупи індикаторів торкалися верхньої грані штампа посередині його сторін (рис. 1).

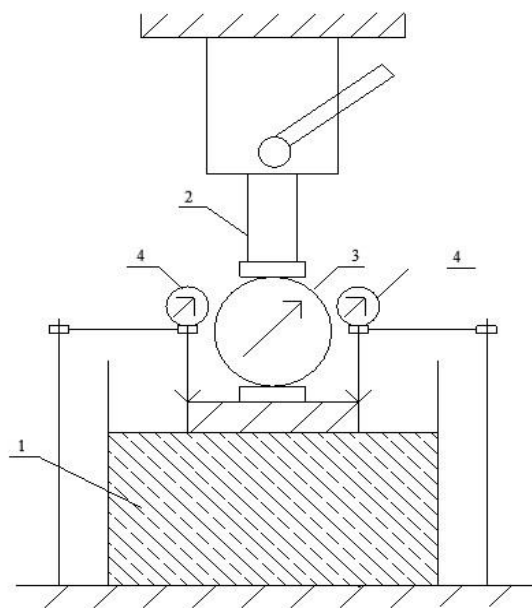


Рис. 1. Схема випробування моделі ґрунтополімерної композиції статичним навантаженням:

- 1 – ємкість з ґрунтополімерною композицією (або ґрунтом); 2 – гідравлічний домкрат;  
3 – динамометр; 4 – індикатори лінійних переміщень годинникового типу

Модель ґрунту основи навантажується за допомогою домкрата ступенями з шагом 67 кг (10 поділок індикатора динамометра) до максимальної величини 600 кг, що відповідає навантаженню основи під більшістю водопропускних труб з коефіцієнтом перевантаження 1,5. Для кожного ступеня навантаження за допомогою динамометра фіксуються величина сили (напруги) і за допомогою чотирьох індикаторів – переміщення (за результат приймається середнє арифметичне з чотирьох).

Три моделі з ґрунтополімерною композицією та дві контрольні моделі послідовно випробуються з обов'язковим контролем вологості на момент випробувань. Навантаження виконується у два етапи: первинне навантаження, при якому відбувається обтиснення штампом нерівного поверхневого шару, і вторинне,

за яким власне будуються діаграми сила – переміщення, напруга – переміщення, напруга – відносна деформація. Результати випробувань обробляються і наводяться у вигляді діаграм (рис. 2). На рис. 2 наведено результати фактично виконаних досліджень у вигляді діаграм залежності відносної деформації  $\epsilon$  від статичного стискального напруження  $\sigma$ . Як бачимо, діаграми для ґрунту у природному стані повністю співпали для обох моделей, для ґрунтополімерної композиції – дещо відрізняються для трьох моделей, отже вимагають статистичної обробки або усереднення. Деформативність ґрунтополімерної композиції набагато менша, ніж ґрунту у природному стані. Діаграми дозволяють визначати модуль деформації композита для будь-якої величини статичного стискального напруження.

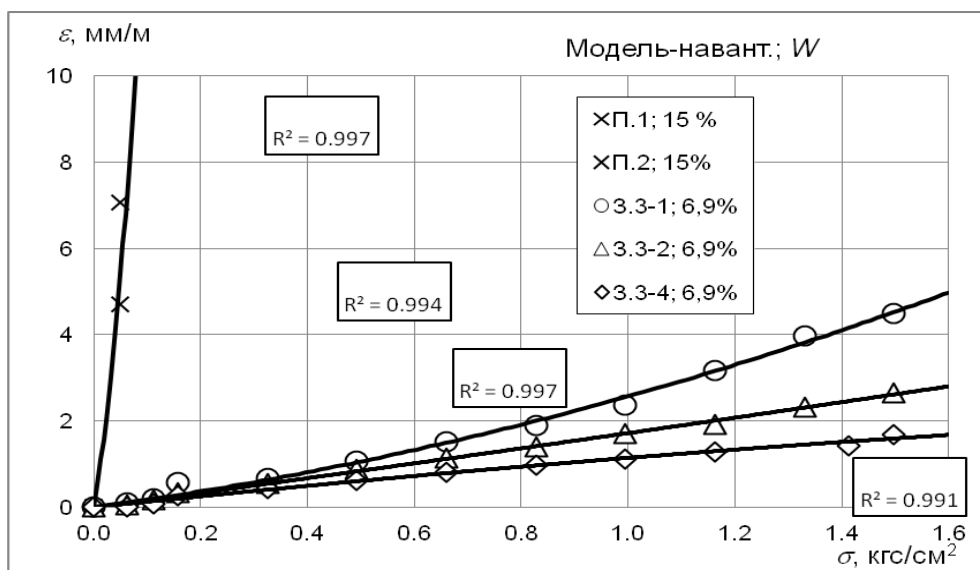


Рис. 2. Залежність відносної деформації  $\epsilon$  моделей ґрунту у природному стані П.1, П.2 і ґрунтополімерної композиції 3.3 від стискального напруження  $\sigma$

Також на рис. 2 наведено величини квадратів коефіцієнта кореляції  $R^2$  отриманих залежностей  $\epsilon$  від  $\sigma$ . Їхні величини знаходяться в межах 0,991–0,997, що свідчить про коректність визначення залежностей запропонованим методом.

*Методика динамічних випробувань ґрунтополімерного композита.* Динамічні випробування проводяться у випробувальній машині МУП-50 (рис. 3). На ґрунт по осі моделі накладається квадратний металевий штамп з розміром сторін 200 мм.



До штампа за допомогою машини МУП-50 прикладається динамічне навантаження частотою 3 Гц, максимальною силою 400 кг, що відповідає сумі постійного і тимчасового навантаження, і мінімальною 200 кг, що відповідає постійному

навантаженню. Динамічне навантаження прикладається протягом 109 тис. циклів. Через кожні 9900 циклів (30 хв) випробування призупиняється і вимірюється величина осідання ґрунту (штампа).



Рис. 3. Випробування моделі ґрунтополімерної композиції динамічним навантаженням

Три моделі з ґрунтополімерною композицією та дві контрольні моделі послідовно випробовуються з обов'язковим контролем вологості на момент випробувань. Результати випробувань обробляються і наводяться у вигляді діаграм (рис. 4). На цьому ж рис. 4 наведено також рівняння регресії отриманих залежностей  $\epsilon$  від  $N$  та величини квадратів їхнього коефіцієнта кореляції  $R^2$ . Як бачимо, отримані залежності апроксимуються поліномами ступеня від 1 до 3. Величини  $R^2$  знаходяться в межах 0,991–1, що свідчить про коректність визначення залежностей запропонованим методом.

Як бачимо з діаграм, деформативність ґрунтополімерної композиції набагато менша, ніж ґрунту у природному стані. Діаграми дозволяють визначити модуль

вібродеформації композита для будь-якої величини кількості циклів динамічного навантаження.

*Методика оцінювання показників довговічності ґрунтополімерного композита.* Довговічність ґрунтополімерного композита в умовах відсутності інсоляції найбільше буде залежати від поперемінного водонасичення і зневоднення. В умовах експлуатації споруд і будівель залізничного транспорту за рік, як правило, відбувається 2 цикли: навесні та восени – водонасичення, влітку та взимку – зневоднення. Для оцінювання довговічності ґрунтополімерного композита запропоновано визначити втрати маси зразків композита від кількості циклів поперемінного водонасичення та висушування та порівнювати її з втратами маси аналогічних матеріалів з відомою довговічністю.

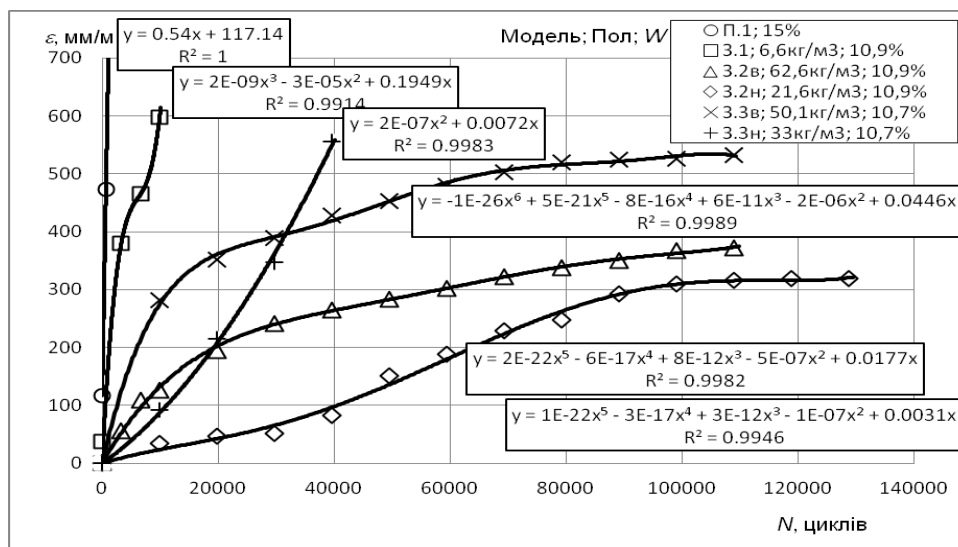


Рис. 4. Залежність відносної деформації  $\varepsilon$  від кількості циклів динамічного навантаження  $N$  всіх моделей: ґрунту у природному стані П, ґрунтополімерної композиції 1 (3.1), ґрунтополімерної композиції 2 (верхня частина 3.2в, нижня частина 3.2н), ґрунтополімерної композиції 3 (верхня частина 3.3в, нижня частина 3.3н)

Для проведення досліджень із кожної моделі ґрунтополімерного композита на кам'янорізальному верстаті вирізається 8 зразків (рис. 5). Зразки піддаються попереминому водонасиченню та висушуванню. До початку випробувань і після кожного циклу всі зразки зважуються та розраховуються втрати ними маси  $\Delta m$ . За результатами досліджень будується графік залежності втрат маси  $\Delta m$  від кількості циклів попереминого зволоження – висушування  $N$  (рис. 6). Оцінку довговічності ґрунтополімерного композита запропоновано визначати, порівнюючи

втрати маси його зразків з втратами маси аналогічних зразків ґрунтов'яжучих композитів з відомою довговічністю, наприклад ґрунту, закріпленого силікатизацією (рис. 6). На рис. 6 наведено також рівняння регресії отриманих залежностей  $\Delta m$  від  $N$  та величини квадратів їхнього коефіцієнта кореляції  $R^2$ . Як бачимо, отримані залежності апроксимуються логарифмічними рівняннями. Величини  $R^2$  знаходяться в межах 0,704–0,887, що свідчить про коректність визначення залежностей запропонованим методом.



Рис. 5. Зразки з ґрунтом до випробувань на стійкість до переминого зволоження та висушування

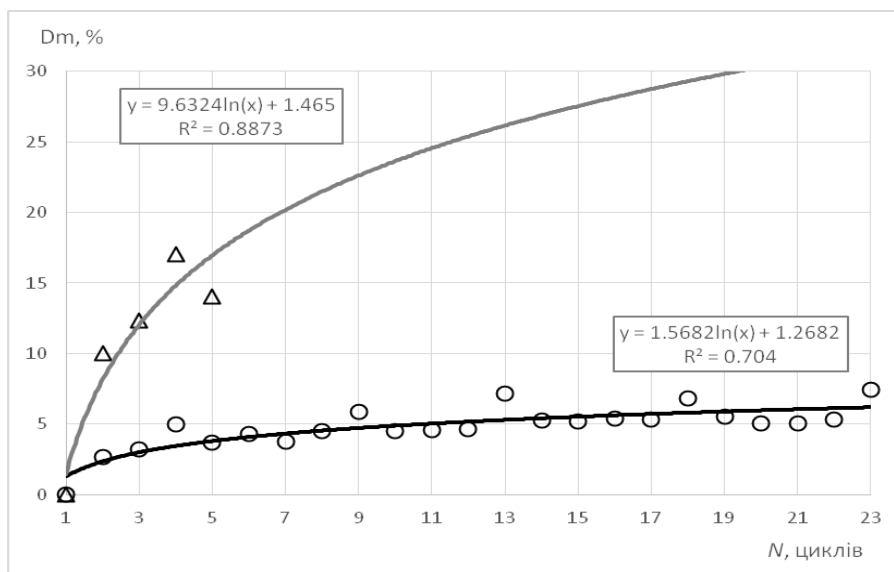


Рис. 6. Залежність середньої величини втрати маси  $\Delta m$  зразками грунтополімерної композиції (кружочки) і ґрунту, закріпленого силікатизацією (трикутники) від кількості циклів попереминого зволоження – висушування  $N$

Аналіз структури моделей і зразків показав, що у грунтополімерному композиті наявні дві зони: внутрішня вузька зона неповністю спіненого поліуретану та прилегла до неї зовнішня зона суміші поліуретану і ґрунту, у якій частка поліуретану зменшується з віддаленням від першої зони. Втрати маси зразками грунтополімерного композита обумовлені вимиванням («випадінням») із його зовнішньої зони частинок ґрунту. Після 10 циклів втрати маси грунтополімерного композита досягли 5%. У подальшому вимивання частинок ґрунту практично припиняється і втрати маси не перевищують 6%. У разі закріплення ґрунту силікатизацією втрати маси вже після 2 циклів перевищують 10% і в подальшому продовжують збільшуватись, перевищуючи після 10 циклів 23%.

Враховуючи довговічність закріплення ґрунту силікатизацією 15 років, очікувану довговічність грунтополімерного композита можна оцінити як  $15 \times 23 / 6 = 60$  років.

**Висновки.** Таким чином, розроблено та відпрацьовано оригінальну методику дослідження деформативних властивостей грунтополімерного композита, утвореного ін'єктуванням у глинистий ґрунт поліуретанового матеріалу SPT®, під впливом статичних і динамічних навантажень, що полягає у виготовленні та випробуванні моделей композита.

Крім деформативних властивостей композита, для оцінювання його довговічності запропоновано визначати втрати маси зразків композиту від кількості циклів попереминого висушування та зволоження та порівнювати їх з втратами маси аналогічних матеріалів з відомою довговічністю.

#### Список використаних джерел:

1. Independent diagnostic computer systems with the ability to restore operational characteristics of construction facilities [Text] / A. Plugin, L. Trykoz, O. Herasymenko, A. Pluhin, V. Konev // *Diagnostyka*. – 2018. – Vol. 19. – No. 2. – P. 13–23. DOI: 10.29354/diag/83009.

2. Розрахунки несучої здатності і технологія закріплення основ будівель і споруд залізничного транспорту [Текст] : навч. посібник / А. М. Пługін, А. А. Пługін, Л. В. Трикоз, [та ін.]; за ред. А. М. Пługіна. – Харків : УкрДАЗТ, 2011. – Ч.1. – 150 с. – Ч.2. – 274 с.

3. Трикоз, Л. В. Исследование деформационных характеристик грунтовых материалов с использованием отходов [Текст] / Л. В. Трикоз, В. Ю. Савчук. – Днепропетровск : ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2017. – 2(68). – С. 166–173 с. DOI: 10.15802/ stp2017/100249.

4. Butenko, A. Regulation of stress-strain state and calculation of deformations of continuous foundations under increased multiple loads [Text] / A. Butenko, O. Gerasimenko // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 116, № 01002. – P. 5. DOI: 10.1051/mateconf/2017116010002.

5. Ржаницын, Б. А. Химическое закрепление грунтов в строительстве [Текст] / Б. А. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1986. – 264 с.

6. Савйоский, В. В. Ремонт и реконструкция гражданских зданий [Текст] / В. В. Савйоский, О. Н. Болотских. – Харьков : Ватерпас, 1999. – 288 с.

7. Реконструкция зданий и сооружений [Текст] / А. Л. Шагин, Ю. В. Бондаренко, Д. Ф. Гончаренко, В. Б. Гончаров; под. ред. А. Л. Шагина. – М. : Высш. шк., 1991. – 352 с.

---

Пługін Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-63. E-mail aaplugin@gmail.com.

Мірошніченко Сергій Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-64. E-mail Miroshnichenko@kart.edu.ua.

Зверева Аліна Сергіївна, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-25. E-mail zveirievaAS@kart.edu.ua. Резніченко Іван Вікторович, інженер ТОВ «СПТ Україна». Тел. (093) 800 94 00 E-mail:riv.spt@gmail.com.

Пługин Андрей Аркадьевич, д-р техн. наук, профессор кафедры строительных материалов, конструкций и сооружений Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (057) 730-10-63. E-mail aaplugin@gmail.com.

Мірошніченко Сергій Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри строительных материалов, конструкций и сооружений Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (057) 730-10-64. E-mail Miroshnichenko@kart.edu.ua.

Зверева Алина Сергеевна, аспирант кафедры строительных материалов, конструкций и сооружений Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (057) 730-10-64. E-mail Miroshnichenko@kart.edu.ua. Резніченко Іван Вікторович, інженер ТОВ «СПТ Україна». Тел. (093) 800 94 00 E-mail:riv.spt@gmail.com.

Plugin Andriy , D. Sc. (Tech.), professor, Department of Construction Materials, Constructions and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-63. E-mail aaplugin@gmail.com.

Miroshnichenko Sergsii, PhD (Tech.), associate professor, Department of Construction Materials, Constructions and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-64. E-mail Miroshnichenko@kart.edu.ua.

Zvierieva Alina, postgraduate student, Department of Construction Materials, Constructions and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-25. E-mail zveirievaAS@kart.edu.ua. Reznichenko Ivan, engineer LLC SPT Ukraine. Tel: (093) 800 94 00. E-mail riv.spt@gmail.com.

Статтю прийнято 21.12.2018 р.

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)**

---

УДК 625.11

**ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЯХ МЕЖРЕГИОНАЛЬНОГО СООБЩЕНИЯ**

Канд. техн. наук Г. В. Ахраменко, старш. преп. Т. А. Дубровская

**ОСОБЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНИХ ЛІНІЯХ МІЖРЕГІОНАЛЬНОГО СПОЛУЧЕННЯ**

Канд. техн. наук Г. В. Ахраменко, старш. викл. Т. О. Дубровська

**FEATURES OF TRAINING MOVEMENT OF TRAINS ON RAILWAY LINES OF INTERREGIONAL COMMUNICATION**

PhD (Tech.) G. V. Akhramenko, senior lecturer T. A. Dubrovskaya

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.182.2018.160129>

---

*Скорость движения пассажирских поездов является важнейшим показателем качества пассажирских перевозок. Для успешной интеграции Белорусской железной дороги в мировой транспортный рынок необходимо развитие скоростного пассажирского движения, что позволит поднять качество предоставляемых транспортных услуг на более высокий уровень. Повышение скорости в пассажирском сообщении делает железную дорогу конкурентоспособной с другими видами транспорта. Ближайшая скоростная перспектива – 160 км/ч.*

*С повышением участковой скорости в пассажирском движении ускоряется доставка пассажиров и улучшается их обслуживание. Однако повышение скорости не только обеспечивает экономию, но и вызывает дополнительные транспортные затраты. Их величина зависит от того, за счет каких мероприятий обеспечивается рост скоростей. При росте технической скорости повышаются расходы топлива (электроэнергии) на тягу, растут издержки по содержанию подвижного состава, верхнего строения пути. Поэтому при расчете общей экономии от увеличения скорости необходимо учитывать и дополнительные затраты, вызываемые ростом скорости. В отдельных случаях их величина не ограничивается только эксплуатационными расходами. Так, если рост скорости будет обеспечиваться за счет усиления верхнего строения пути или внедрения более мощных локомотивов, дороге потребуются дополнительные инвестиции.*

*В статье рассмотрен метод увеличения скорости движения на железнодорожных линиях межрегионального сообщения с учетом их особенностей. В данном случае, учитывая небольшую протяженность железнодорожных направлений, связывающих столицу Республики Беларусь г. Минск с областными центрами, увеличение скорости только за счет модернизации железнодорожного пути эффекта не даст. Поэтому предлагается комплексный подход к решению данной проблемы – увеличение скорости движения за счет модернизации и организационно-технических мероприятий.*

**Ключевые слова:** железнодорожные линии, скорость, модернизация, расходы, задачи.

*Швидкість руху пасажирських поїздів є найважливішим показником якості пасажирських перевезень. Для успішної інтеграції Білоруської залізниці у світовий транспортний ринок необхідний розвиток швидкісного пасажирського руху, що дозволить підняти якість транспортних послуг на більш високий рівень. Підвищення швидкості в пасажирському сполученні робить залізницю конкурентоспроможною з іншими видами транспорту. Найближча швидкісна перспектива – 160 км/год.*

*З підвищенням дільничної швидкості в пасажирському русі прискорюється доставка пасажирів і поліпшується їхнє обслуговування. Однак підвищення швидкості не тільки забезпечує економію, але викликає додаткові транспортні витрати. Їхня величина залежить від того, за рахунок яких заходів забезпечується зростання швидкостей. При зростанні технічної швидкості підвищуються витрати палива (електроенергії) на тягу, збільшуються витрати на утримання рухомого складу, верхньої будови колії. Тому при розрахунку загальної економії від збільшення швидкості необхідно враховувати і додаткові витрати, викликані зростанням швидкості. В окремих випадках їхня величина не обмежується тільки експлуатаційними витратами. Так, якщо зростання швидкості буде забезпечуватися за рахунок посилення верхньої будови колії або впровадження більш потужних локомотивів, залізниці будуть потрібні додаткові інвестиції.*

*У статті розглянуто метод збільшення швидкості руху на залізничних лініях міжрегіонального сполучення з урахуванням їхніх особливостей. У даному випадку з огляду на невелику протяжність залізничних напрямків, що зв'язують столицю Республіки Білорусь м. Мінськ з обласними центрами, збільшення швидкості тільки за рахунок модернізації залізничної колії ефекту не дасть. Тому пропонується комплексний підхід до вирішення даної проблеми – збільшення швидкості руху за рахунок модернізації і організаційно-технічних заходів.*

**Ключові слова:** залізничні лінії, швидкість, модернізація, витрати, завдання.

*Speed of the movement of passenger trains is the most important indicator of quality of passenger traffic. Successful integration of the Belarusian railroad into the world transport market requires development of high-speed passenger traffic that will allow to lift quality of the provided transport services to higher level. Increase in speed in passenger traffic does the railroad competitive with other means of transport. The near-term high-speed outlook – 160 km/h.*

*With increase in local speed in passenger traffic delivery of passengers accelerates and their service improves. However increase in speed not only provides economy, but causes additional transport expenses. Their size depends on through what actions growth of speeds is provided. With a growth of technical speed fuel consumption (electric power) on draft increase, costs for the maintenance of the rolling stock, the top structure of a way grow. Therefore when calculating the general savings from increase in speed it is necessary to consider also the additional expenses caused by growth of speed. In some cases their size isn't limited only to operational costs. So, if growth of speed is provided due to strengthening of the top structure of a way or introduction of more powerful locomotives, the road will need additional investments.*

*In article the method of increase in speed of the movement on railway lines of the interregional message taking into account their features is considered. In this case considering small extent railway the directions, connecting the capital of Republic of Belarus Minsk with the regional centers, increase in speed only due to modernization of a railway track of effect won't give. Therefore an integrated approach to the solution of this problem – increase in speed of the movement for the account of modernization and organizational and technical actions is offered.*

**Keywords:** railway lines, speed, modernization, costs, tasks.

**Введение.** Возрастание скорости движения пассажирских поездов дает большой экономический эффект, выражающийся в увеличении провозной способности линий, снижении эксплуатационных расходов, уменьшении затрат трудовых ресурсов (локомотивных и поездных бригад), сокращении потребного парка вагонов и локомотивов, затрат на топливо и электроэнергию.

Социально-экономический рост сопровождается повышением спроса на высокоскоростной транспорт, поскольку обеспечивает гражданам страны свободу перемещения с минимальными временными затратами.

Необходимым условием повышения скоростей движения на железнодорожных линиях межрегионального сообщения является возможность достижения времени нахождения пассажира в пути, не превышающего максимально допустимого, принятого из условия обеспечения минимальной утомляемости организма и равного 3-5 часам в одну сторону [2].

Достижение этого условия может быть осуществлено по двум направлениям:

- совершенствование параметров постоянных устройств за счет модернизации, в результате которой можно достичь заданного сокращения времени хода и которая при необходимости включает и реконструкцию;

- осуществление организационно-технических мероприятий, при которых экономия во времени достигается путем отмены остановок на отдельных пунктах, дающих незначительное пополнение пассажиропотока.

Теоретические основы методики повышения скоростей движения за счет модернизации, не исключающей и реконструкцию, изложены в работах [3, 4]. Но эти методики характерны для железнодорожных линий большой протяженности. Для направлений межрегионального сообщения, имеющих небольшую протяженность, указанная выше методика неприемлема. Для таких

направлений разработана модель решения задачи, которая приведена в работе [5].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ зарубежной литературы показал, что накоплен значительный мировой опыт по повышению скоростей движения пассажирских поездов. Лидерами в этой области являются Япония и Франция.

Проблема повышения скорости движения поездов интересовала, помимо зарубежных ученых, также и наших соотечественников. Этой проблемой занимались такие видные ученые, как Турбин И. В., Кантор И. И., Харина Е. В. [3], Селезнева Н. Е. [4], Курган Д. Н. [7] и др. За рубежом эту проблему решали также многие ученые, среди которых Keith Barrow [10], Levinson David M [11] и др.

Современные исследования показали, что расчет повышения скоростей движения тесно связан с математическими методами и расчетами. Одними из эффективных современных методов расчета сокращения времени хода являются математические методы, основанные на принципах условной оптимизации.

**Определение цели и задачи исследования.** Повышение скоростей пассажирских поездов – одно из приоритетных направлений научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте.

Основной задачей исследования является сократить время пассажира в пути на межрегиональных линиях до максимально допустимого, принятого из условия обеспечения минимальной утомляемости организма и равного 3–5 часам в одну сторону [2].

Целью данного исследования является сокращение времени хода для обеспечения удобства и комфортабельности езды пассажиров.

**Основная часть исследования.** За основу создания такой модели принят полученный при разработке ЦКП «Прогресс» [5] график зависимости величины капитальных вложений от

сокращения времени хода  $K = f(\Delta t)$ . Основной особенностью принятой модели является определение сокращения времени хода на основе отмены остановок. На рисунке справа приведена зависимость  $K = f(\Delta t)$ , слева на графике приведена зависимость, определяющая эти потери от сэкономленного времени хода,  $\Delta\Pi_{\text{пас}} = f(\Delta t_{\text{ост}})$ . Аппроксимируя зависи-

мости  $K = f(\Delta t_{\text{орп}})$  и  $\Delta\Pi_{\text{пас}} = f(\Delta t_{\text{ост}})$ , получаем уравнения указанных кривых

$$K = a(\Delta t_{\text{орп}})^2, \text{ или } K = a(\Delta t_3 - \Delta t_{\text{ост}})^2, \quad (1)$$

$$\Delta\Pi_{\text{пас}} = b\Delta t_{\text{ост}}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты уравнений, полученные в результате аппроксимации.

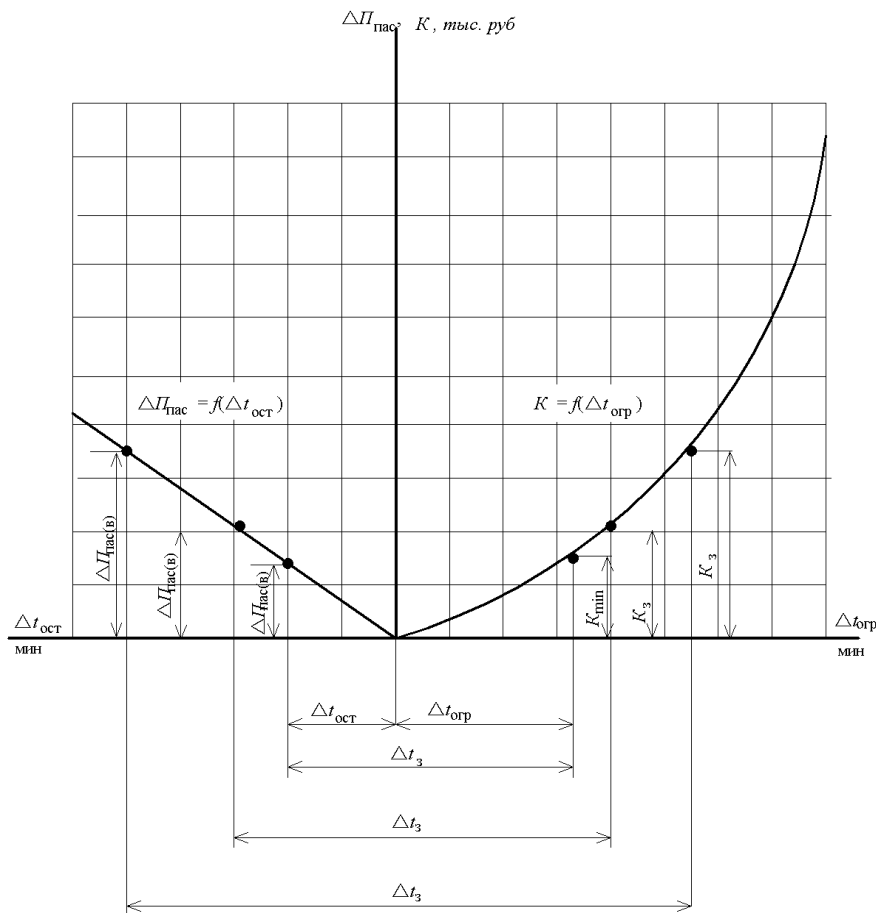


Рис. Графическое решение задач

Приведенная модель позволяет определить рациональную величину экономии времени хода за счет временной отмены остановок, при этом критерием является величина, представляющая собой сумму, состоящую из капиталовложений, необходимых для снятия ограничений скорости, и

окапитализированных социальных потерь, полученных при отмене остановок, которую необходимо минимизировать:

$$\mathcal{E} = K + \Delta\Pi_{\text{пас}} \rightarrow \min.$$

С учетом формул (1) и (2)

$$\mathcal{E} = a(\Delta t_3 - \Delta t_{\text{ост}})^2 + b\Delta t_{\text{ост}} \rightarrow \min. \quad (3)$$



или

$$\mathcal{E} = a\Delta t_3^2 - 2a\Delta t_3\Delta t_{\text{ост}} + a\Delta t_{\text{ост}}^2 + b\Delta t_{\text{ост}} \rightarrow \min.$$

Продифференцировав это уравнение по  $\Delta t_{\text{ост}}$  и приравняв его к 0, получим следующее выражение:

$$\frac{d\mathcal{E}}{d\Delta t_{\text{ост}}} = -2a\Delta t_3 + 2a\Delta t_{\text{ост}} - b = 0.$$

Решая полученное выражение относительно  $\Delta t_{\text{ост}}$ , получаем

$$\Delta t_{\text{ост}} = \Delta t_3 - \frac{b}{2a}. \quad (4)$$

Полученное выражение позволяет определить целесообразную экономию во времени, получаемую в результате формирования оптимальной схемы остановок.

Таким образом, приведенная модель решения задачи повышения скорости движения пассажирских поездов на направлениях малой протяженности позволяет заранее определить ряд важных показателей:

- ожидаемый социальный ущерб при отмене остановок  $\Delta P_{\text{пас}}$ ;
- величину необходимых капитальных вложений  $K_{\text{min}}$ ;
- величину возможного сокращения времени хода  $\Delta t_{\text{в}}$ ;
- составляющие заданного сокращения времени хода  $\Delta t_{\text{огр}}$  и  $\Delta t_{\text{ост}}$  и т. д.

Это дает возможность ЛПР в зависимости от конкретной ситуации производить выбор проектного решения.

Очевидно, на первом этапе введения скоростных поездов межрегионального сообщения необходимое сокращение времени хода будет получено преимущественно за счет отмены остановок  $\Delta t_{\text{ост}}$ . Поскольку процесс модернизации требует определенного временного интервала, то предварительно целесообразную величину этого сокращения можно определить в

соответствии с выражением (4) в дальнейшем, т. е. на последующих этапах. За счет выделяемых капиталовложений на процесс модернизации достигается дополнительное сокращение времени хода, позволяющее формировать новую схему остановок с целью открытия отмененных ранее остановок.

Очевидно, на первом этапе при введении в обращение поездов указанного типа преимущественное сокращение времени хода будет достигаться за счет организационно-технических мероприятий, т. е. временной отмены остановок на промежуточных отдельных пунктах. Величина этого сокращения  $\Sigma \Delta t_{\text{ост}}$  определяется разностью между заданным и возможным сокращением, достигаемым в результате модернизации постоянных устройств в рамках выделяемых капиталовложений в течение первого этапа  $\Sigma \Delta t_{\text{огр}}$ . При назначении схемы остановок немаловажное значение имеет социальный фактор, т. к. пассажиры, проживающие в населенных пунктах, тяготеющих к отдельному пункту, где предполагается отмена остановки, будут иметь значительные потери времени и определенные неудобства. В силу этого назначение схемы остановок должно осуществляться из следующих соображений:

- должны быть учтены социальные факторы, т. е. обеспечение максимальных удобств для пассажиров, пользующихся указанными поездами;
- необходим учет экономических факторов, т. е. получение максимального эффекта при отмене остановок;
- обеспечение необходимого сокращения времени хода;
- сохранение остановок на тех отдельных пунктах, где происходит наиболее интенсивное накопление пассажиропотока, т. е. в зоне крупных населенных пунктов с

достаточно развитым промышленным и сельскохозяйственным комплексом.

С учетом вышеизложенного поставленную задачу можно сформулировать следующим образом: назначить такую схему остановок, которая при максимальном их числе обеспечила бы уровень среднеходовой скорости, при котором достигается необходимое сокращение времени хода в данном направлении.

В результате отмены остановок на отдельных пунктах сократятся эксплуатационные расходы, связанные с дополнительной механической работой моторвагонного подвижного состава в процессе разгона, замедления и стоянки; затраты, связанные с задержкой пассажиров в пути, находящихся в поезде; но с другой стороны, увеличатся затраты, обусловленные дополнительным временем ожидания и проезда пассажиров, проживающих на отменяемом остановочном пункте.

Математическая модель назначения схемы остановок состоит из отдельных элементов, определяющих вышеперечисленные факторы и характеризующих процесс в целом:

- экономия в эксплуатационных расходах  $\Delta C_{ост}$ , обусловленная экономией в энергетических затратах, определяется по формуле

$$\Delta C_{ост} = \sum_{i=1}^p M_i, \quad (5)$$

где  $P$  – число отменяемых остановок;

$M_i$  – экономия в эксплуатационных расходах в результате отмены остановки на  $i$ -м отдельном пункте, у. е.;

- экономия в затратах пассажиров  $\Delta Z_{пас}$ , находящихся в поезде, в результате отмены остановки на  $i$ -м отдельном пункте, у. е.,

$$\Delta Z_{пас} = \frac{a_{пч}}{60} \sum_{i=1}^p (n_0 + \sum_{i=1}^{m-p} n_i) \Delta t_{i(ост)}, \quad (6)$$

где  $m$  – число всех существующих остановок на рассматриваемом направлении;

$a_{пч}$  – стоимость пассажиро-часа, у. е./пас.ч;

$n_0$  – число пассажиров, севших в поезд на станции отправления, пас;

$n_i$  – число пассажиров, севших в поезд на  $i$ -м отдельном пункте, где остановка поезда сохранена, пас;

$\Delta t_{i(ост)}$  – экономия во времени в результате отмены остановки на  $i$ -м отдельном пункте, мин;

- потери  $\Delta \Pi_{пас}$ , обусловленные дополнительным временем ожидания пассажирами отменяемого остановочного пункта более позднего поезда и дополнительным временем пребывания их в пути следования за счет различия в скоростях движения ускоренного межрегионального и обычного пассажирского поезда, у. е.,

$$\Delta \Pi_{пас} = \frac{a_{пч}}{60} \sum_{i=1}^p n_i (\tau_i + \Delta t_{сли}), \quad (7)$$

где  $\tau_i$  – дополнительное время ожидания пассажирами  $i$ -го отдельного пункта более позднего поезда в связи с отменой остановки, мин;

$\Delta t_{сли}$  – дополнительное время пребывания в пути следования пассажиров отменяемого остановочного пункта, мин.

В соответствии с вышеизложенным математическая модель выбора схемы остановок будет выглядеть следующим образом:

$$\sum_{i=1}^p A_i = \Delta C_{(ост)} + \Delta Z_{(пас)} - \Delta \Pi_{(пас)} \rightarrow \max, \quad (8)$$

при условии

$$\sum_{i=1}^p \Delta t_{i(\text{ост})} \geq \Delta t_{3(\text{ост})}, \quad (9)$$

где  $\Sigma A_i$  – суммарный эффект, получаемый в результате отмены некоторых остановок, у. е.;

$\Delta t_{3(\text{ост})}$  – необходимое сокращение времени хода за счет отмены остановок, мин.

Целью решения задачи является достижение максимального суммарного эффекта  $\Sigma A_i$  при обеспечении необходимого сокращения времени хода за счет отмены остановок  $\Delta t_{3(\text{ост})}$ .

Для выявления возможных схем остановок при небольшом числе допустимых решений (число остановок на основных направлениях Белорусской железной дороги ввиду их небольшого протяжения не превышает 10...15) предлагается метод перебора с ограничениями [6]. Применение этого метода основывается на следующем:

- у критерия, в качестве которого принят суммарный эффект  $\Sigma A_i$ , ослаблено свойство аддитивности;
- сравнительно небольшое число возможных решений;
- данные, полученные в результате применения метода перебора с ограничениями, расширят сферу выбора для ЛПР;
- реализация данного метода достаточна проста при условии использования ПЭВМ.

Применяемый метод перебора с ограничениями предусматривает решение задачи выбора оптимальной схемы остановок в два этапа. На первом этапе из всех допустимых решений, полученных в результате метода перебора с ограничениями, выбираются эффективные, или иначе множество по Парето [7], на втором этапе полученные альтернативные варианты схем остановок, удовлетворяющие требованиям заданной экономии во времени, сравниваются между собой и из их числа выбирается одна.

Исходные данные для выбора рациональной схемы остановок на существующих отдельных пунктах включают в себя:

- число существующих остановок;
- число пассажиров на станциях отправления;
- число пассажиров на промежуточных отдельных пунктах;
- время, необходимое на разгон, замедление и стоянку поездов на каждом остановочном пункте.

Предлагаемый метод опробован на Белорусской железной дороге на участке Минск – Гродно.

Процесс сбора исходных данных завершается построением диаграммы накопления пассажиропотока (табл. 1) [5].

Следующий этап включает в себя производство тяговых расчетов с целью определения существующего времени хода, а также максимально возможного сокращения времени хода при снятии всех ограничений скорости (табл. 2).

Таблица 1

Накопление пассажиропотока на направлении Минск-Гродно

Название остановочного пункта	Расстояние, км	Прирост пассажиров на станции, чел
1	2	3
Минск	-	450
Белорусь	26,3	2
Молодечно	50,9	13
Воложин	36,4	2

Продолжение табл. 1

1	2	3
Богданов	22,3	2
Юратишки	20,3	2
Гавья	19,9	2
Лида	29,0	16
Скрибовцы	30,7	5
Рожанка	20,1	10
Мосты	22,9	37
Черлена	18,1	3
Скидель	10,3	6
Гродно	29,7	$\Sigma$ 550

Таблица 2

Показатели, определяющие эффект на каждом остановочном пункте в результате отмены на нем остановки

Наименование раздельных пунктов	Показатели				
	Экономия в эксплуата- ционных расходах, $\Delta C$ , млн руб./год	Экономия в затратах для пассажиров, находящихся в поезде	Экономия во времени в результате отмены остановки $\Delta t_{i(ост)}$ , мин	Социальные потери, $\Delta P_{пас}$ , обусловлен- ные отменой остановки, млн руб./год	Эффект, $A_i$ , млн руб/год
Белорусь	44	22	6	6	60
Молодечно	59	34	9	5	86
Воложин	33	21	3	2	42
Богданов	31	14	3	4	41
Юратишки	29	11	3	2	38
Гавья	28	17	4	3	39
Лида	118	65	16	15	157
Скрибовцы	29	20	5	5	41
Рожанка	52	20	6	13	59
Мосты	52	26	7	22	52
Черлена	29	15	4	4	38
Скидель	40	18	5	12	44
Гродно	-	-	-	-	-

Для снятия ограничений скорости путем модернизации требуется определенный временной интервал, поэтому мероприятия должны быть распределены во времени с учетом имеющихся возможностей дороги.

При введении ускоренных поездов межрегионального сообщения достичь  $\Delta t_3$  только за счет модернизации не представляется возможным, т. к.:

- процесс модернизации не может быть осуществлен одновременно, а требует

какого-то определенного временного интервала;

- даже при снятии всех ограничений скорости полученное при этом сокращение времени хода  $\sum \Delta t_{\text{огр}}$  не может обеспечить заданное  $\Delta t_3$ .

В то же время достижение  $\Delta t_3$  только за счет экономии во времени в результате отмены остановок приведет к значительным социальным потерям. Поэтому предлагается решение, в соответствии с которым заданное сокращение времени хода предлагается достичь следующим образом:

$$\Delta t_3 = \sum \Delta t_{\text{огр}} + \sum \Delta t_{\text{ост}}. \quad (10)$$

Эта формула предполагает достижение  $\Delta t_3$  на первом этапе в основном за счет временной отмены остановок, но с постепенным осуществлением процесса модернизации, в результате которой сокращение времени хода будет увеличиваться, появится возможность открытия остановок, отмененных первоначально.

Этапный процесс модернизации и формирования оптимальной схемы остановок (этапом является год) продолжается до тех пор, пока не будет исчерпана возможность сокращения времени хода за счет модернизации. Схему остановок, полученную на последнем этапе, можно считать окончательной. В случае необходимости открытия оставшихся отмененных остановок при условии сохранения заданного сокращения времени хода, очевидно, встанет вопрос о мерах реконструктивного характера, включающих в себя реконструкцию плана линии, ИССО и т. д.

**Выводы.** В статье предложена методика формирования рационального плана введения ускоренных поездов межрегионального сообщения, позволяющая найти решение, обеспечивающее заданное время хода за счет взаимоувязанного комплекса мероприятий по совершенствованию параметров постоянных устройств и формированию схемы остановок.

Предложенная методика формирования оптимальной схемы остановок позволяет учесть не только денежный выигрыш, но и социальные потери. Реализация методики осуществляется методами решения комбинаторных задач целочисленного программирования, применение которых зависит от целей, поставленных перед ЛПР, и числа анализируемых остановок: метод перебора с ограничением и метод неявного (частичного) перебора.

Предложенный метод был апробирован на направлении Минск–Гродно Белорусской железной дороги протяженностью 337 км. На указанном направлении расположено 12 промежуточных остановочных пунктов, время нахождения пассажиров в пути составляло 5–5,5 ч. С учетом расчетов и табл. 1 и 2 получили, что на направлении Минск–Гродно оптимальная схема остановок должна включать только 4 остановочных пункта: Молодечно, Богданов, Лида и Мосты, что позволяет сократить время нахождения пассажиров в пути до 4,5 ч. Учитывая перспективу электрификации данного направления и введения подвижного состава на электрической тяге, а также проведения модернизации постоянных устройств, возможно дополнительное сокращение времени хода.

#### *Список использованных источников*

1. Экономика железнодорожного транспорта [Текст] : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Н. П. Терёшина, В. Г. Галабурда, М. Ф. Трихунков [и др.]. – М. : УМЦ ЖДТ, 2006. – 801 с.
2. Черномордик, Г. И. Сферы применения скоростного пассажирского движения на железных дорогах СССР [Текст] / Г. И. Черномордик, К. В. Паршикова. – М. : Транспорт, 1970. – 57 с.

3. Харина, Е. В. Выбор рациональных мер по повышению скорости движения пассажирских поездов в условиях растущего объема грузовых и пассажирских перевозок [Текст] : автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.22.08 / Е. В. Харина. – М. : МИИТ, 2004. – 24 с.
4. Селезнева, Н. Е. Повышение скоростей движения поездов и рациональное устройство переходных кривых [Текст] : автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.22.08 / Н. Е. Селезнева. – М. : МИИТ, 2001. – 24 с.
5. Ахраменко, Г. В. Модернизация и реконструкция постоянных устройств с целью ввода ускоренных поездов межобластного сообщения (на примере Белорусской железной дороги) [Текст] : дис... канд. техн. наук: 05.22.03 / Г. В. Ахраменко. – М., 1991. – 181 с.
6. Вагнер, Г. Основы исследования операций [Текст] : пер. с англ. / Г. Вагнер; [под ред. В.Я. Алтаева]. – М. : Мир, 1973. – Т. 2. – 486 с.
7. Курган, Д. Н. Методология расчетов железнодорожной колеи при взаимодействии со скоростным подвижным составом [Текст]: автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.22.06 / Д. Н. Курган. – Днепропетровск, 2017. – 35 с.
8. Об утверждении Государственной программы развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016–2020 годы. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 28 апреля 2016 г. № 345. – 35 с.
9. Методические указания по разработке плана оптимального переустройства железнодорожных линий для введения 140–160 км/ч движения пассажирских поездов [Текст] / МПС СССР. – М. : ВНИИЖТ, МИИТ, 1986. – 61 с.
10. Keith Barrow 350 km/h operation resumes on Beijing – Tianjin HSL [Electronic resours] // International Railway Journal. – 08.08.2018. Режим доступа : <http://www.railjournal.com/index.php/asia/350km-h-operation-resumes-on-beijing-tianjin-line.html?channel=523>.
11. Levinson, David M. Accessibility impacts of high-speed rail [Text] // Journal of Transport Geography. – 2012. – №22. – P. 288–291.

---

Ахраменко Галина Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта.

Тел.: +375293442518. E-mail: [ahramenko.galina1@gmail.com](mailto:ahramenko.galina1@gmail.com).

Дубровская Татьяна Алексеевна, старший преподаватель кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта.

Тел.: +375445545253. E-mail: [rt-555@yandex.ru](mailto:rt-555@yandex.ru).

Ахраменко Галина Володимирівна, канд. техн. наук, доцент кафедри проектування, будівництва та експлуатації транспортних об'єктів Білоруського державного університету транспорту. Тел.: +375293442518.

E-mail: [ahramenko.galina1@gmail.com](mailto:ahramenko.galina1@gmail.com).

Дубровська Тетяна Олексіївна, старший викладач кафедри проектування, будівництва та експлуатації транспортних об'єктів Білоруського державного університету транспорту. Тел.: +375445545253.

E-mail: [rt-555@yandex.ru](mailto:rt-555@yandex.ru).

Ahramenko Galina Vladimirovna, PhD (Tech.), associate professor, Department of Designing, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State University of Transport. Tel.: +375293442518.

E-mail: [ahramenko.galina1@gmail.com](mailto:ahramenko.galina1@gmail.com).

Dubrovskaya Tatyana Alekseevna, senior lecturer, Department of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State Transport University. Tel.: +375445545253. E-mail: [rt-555@yandex.ru](mailto:rt-555@yandex.ru).

Статтю прийнято 05.12.2018 р.

УДК 621.391:681.518

**МОДЕЛЬ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КЕРУВАННЯ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИМИ  
ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ НА ПРОМИСЛОВОМУ ЗАЛІЗНИЧНОМУ  
ТРАНСПОРТІ**

Кандидати техн. наук О. Ю. Каменєв, А. О. Лапко, асп. О. В. Щєблїкїна,  
старші викладачі О. В. Лазарєв, М. В. Ушаков

**МОДЕЛЬ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОЗАВИСИМЫМИ  
ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ  
ТРАНСПОРТЕ**

Кандидаты техн. наук А. Ю. Каменев, А. О. Лапко, асп. Е. В. Щєблїкїна,  
старшие преподаватели А. В. Лазарев, М. В. Ушаков

**MODEL OF MUTUALLY DEPENDENT TRANSPORT FLOWS TRAFIC CONTROL  
ON INDUSTRIAL RAILWAY TRANSPORT**

PhD (Tech.) A. Kamenev, PhD (Tech.) A. Lapko, postgraduate student O. Shcheblykina,  
senior lecturer O. Lazariiev, senior lecturer M. Ushakov

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.182.2018.160421>

---

*Досліджено питання, пов'язані з впровадженням інтелектуально-аналітичної підсистеми підтримки прийняття рішень у складі системи диспетчерського керування на промисловому залізничному транспорті. Запропоновано методи реалізації інтелектуально-аналітичного забезпечення диспетчерського керування рухом поїздів на промисловому залізничному транспорті, що використовують різні критерії оптимізації взаємозалежних транспортних потоків. Із використанням апарату теорії графів розроблено та запропоновано математичні моделі, що при своїй програмній реалізації забезпечують оптимальне керування перевезеннями технологічної сировини на промисловому комбінаті.*

**Ключові слова:** комп'ютерна система, диспетчерське керування, транспортна задача, транспортний потік, метод оптимізації.

*Исследованы вопросы, связанные с внедрением интеллектуально-аналитической подсистемы поддержки принятия решений в составе системы диспетчерского управления на промышленном железнодорожном транспорте. Предложены методы реализации интеллектуально-аналитического обеспечения диспетчерского управления движением поездов на промышленном железнодорожном транспорте, использующие различные критерии оптимизации взаимозависимых транспортных потоков. С использованием аппарата теории графов разработаны и предложены математические модели, которые при своей программной реализации обеспечивают оптимальное управление перевозками технологического сырья на промышленном комбинате.*

**Ключевые слова:** компьютерная система, диспетчерское управление, транспортная задача, транспортный поток, метод оптимизации.

*Issues related to the optimal control of interdependent traffic flows during the dispatching centralization of industrial railway transport facilities are investigated. The problem of the intellectual and analytical support of dispatch control and monitoring systems in industrial*

transport is considered. Mathematical models have been developed for the optimal control of transport processes on industrial rail transport according to the criteria of maximizing the transported mass of goods and minimizing rolling mileage. Simulation modeling of the intellectual-analytical decision support system was carried out by the operational personnel of the centralized control room, on the basis of which a number of graphical dependencies of optimization parameters were obtained. A program implementation of the developed models with the purpose of their integration with dispatch centralization systems for the formation of recommendation actions to operational personnel is proposed. Identified ways to further research in the subject area. The adequacy of the proposed methods and models is confirmed by simulation. In particular, on the basis of modeling, graphical dependencies of the parameters of cargo flows on the coordinates of the rolling stock and the density of the commodity mass on the transport network of an industrial combine were obtained. The resulting graphical dependencies in their software implementation allow you to directly determine the best ways to manage the plant's traffic flows. The practical implementation of the methods, models and approaches proposed in the article consists in developing dispatching control and monitoring systems for industrial railway transport on their application software, which will provide recommendations on the optimal management of interdependent train traffic for the transportation of technological raw materials and goods.

**Keywords:** computer system, dispatch control, transport task, traffic flow, optimization method.

**Вступ.** Промисловий залізничний транспорт (ПЗТ) є важливою ланкою виробничо-технологічної мережі більшості підприємств важкої промисловості: металургійної, гірничо-збагачувальної, хімічної тощо. Безперервність і безвідмовність його роботи є необхідною умовою своєчасного та якісного виробітку основної продукції відповідних підприємств [1, 2].

Ефективність експлуатації ПЗТ суттєво підвищується при реалізації методів і засобів диспетчерського керування шляхом впровадження систем диспетчерської централізації (ДЦ), контролю (ДК) і пов'язаних з ними підсистем. Не дивлячись на те, що сучасні системи ДЦ і ДК реалізовані на мікропроцесорній елементній базі з програмною реалізацією логічних та інформаційних функцій, їхні функціональні можливості щодо оптимізації та раціоналізації керуючих задач залишаються на невисокому рівні. Це пов'язано перш за все з тим, що для мікропроцесорних систем ДЦ і ДК першого покоління відповідні функції прикладного програмного забезпечення (ПЗ) дублюють функції морально застарілих релейно-контактних

аналогів, доповнюючи їх лише певним розширеним сервісним забезпеченням (ранжуванням доступу, діалоговими повідомленнями тощо). Проте зазначені сервісні функції покликані лише частково полегшити працю оператора в частині людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ), не будучи призначеними для надання йому допомоги в частині формування управлінських рішень [3-7].

У той же час функціональні можливості мікропроцесорної техніки та ПЗ надають можливості виконувати задачі транспортної оптимізації, тобто реалізації рекомендацій диспетчеру щодо найбільш раціонального використання транспортної мережі підприємства для доставки технологічного вантажу під цехи основного виробництва за різними критеріями (швидкість, пробіг рухомого складу, зменшення вартості доставки тощо). Такі рекомендації формуються на рівні інтелектуально-аналітичної системи (підсистеми) підтримки прийняття рішень (ІАС ППР) у складі ДЦ, що реалізується програмно на основі сформованих оптимізаційних моделей.



Таким чином, вдосконалення інтелектуально-аналітичного забезпечення систем диспетчерського керування (ДЦ-ДК) на промисловому транспорті полягає в розробленні математичних моделей і методів функціонування ІАС ППР, що реалізуються засобами прикладного ПЗ ДЦ-ДК.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемним питанням, пов'язаним з раціоналізацією функцій і вдосконаленням систем диспетчерського керування транспортними процесами, присвячено значну кількість наукових праць вітчизняних і закордонних науковців.

Зокрема в роботі [8] досліджено фактори, які впливають на якість диспетчерського керування перевізним процесом залежно від координат профілю залізничної колії, що отримані засобами GPS. У якості критерію оптимізації диспетчерського керування в цій роботі встановлено мінімізацію ступеня нагріву буксових вузлів рухомого складу та мінімізацію гальмівних шляхів рухомих одиниць залежно від швидкостей руху, плану і профілю залізничної колії. Математичне розв'язання поставлених задач у роботі здійснюється з використанням апарату нечітких множин і нелінійних алгоритмів.

У роботі [9] запропоновано метод оптимізації транспортних процесів на ділянці, пов'язаний із динамічним моделюванням виконаних графіків руху. У якості критеріїв оптимізації розглянуто часові інтервали між поїздами, що відслідковуються різними засобами. Ефективність використання системи ДЦ при цьому оцінюється за функцією мінімізації сумарного значення зазначених інтервалів.

У роботі [10] розроблено метод оптимізації диспетчерського керування транспортними процесами з використанням лінійних алгоритмів, згідно з якими визначається субоптимальна дія на кожному керуючому етапі. Для розв'язання задач оптимізації в роботі застосована

матрична модель транспортних потоків, яка визначає співвідношення між вхідними, вихідними та внутрішніми змінними дискретного автомата, який відтворює динаміку функціонування транспортної мережі.

Методи оптимального керування транспортними потоками з використанням засобів ДЦ, нелінійних алгоритмів і способів визначення мінімальних траєкторій руху розглянуто в роботі [11]. Запропоновані методи використовують поліноміальні моделі нелінійної апроксимації траєкторій руху, відповідно до чого здійснюється чисельне порівняння їхніх довжин із вибором оптимальних маршрутів.

У роботі [12] запропоновано метод диспетчерського керування транспортними одиницями, що передбачає максимальне зближення між попутними потягами з мінімізацією їхнього пробігу на базі моделей критичного порівняння. У його основу закладено топологічне представлення транспортної мережі зі змінними (динамічними) параметрами елементів графічної моделі, тобто використовується ситуативна транспортна ситуація по кожній топологічній гілці для виконання раціональних керуючих дій.

Всі запропоновані в розглянутих роботах методи, моделі та засоби диспетчерського керування об'єднують єдиний принцип, який полягає в програмній їх реалізації на базі мікропроцесорних технічних засобів, і рекомендаційний характер керуючих впливів щодо оперативного персоналу ДЦ. Проте всі вони враховують виключно параметри оптимізації, пов'язані з рухом поїздів без характеристик технологічного вантажу та критичності його доставки до основних підрозділів виробництва.

Таким чином, світова наука щодо раціоналізації та оптимізації диспетчерського керування транспортними потоками враховує здебільшого потреби магістрального залізничного транспорту, у той час як особливості функціонування ПЗТ, що інтегрований у виробничо-технологічний

цикл промислового комбінату, залишаються недостатньо опрацьованими. Таким чином, виникає необхідність проведення науково-прикладного дослідження щодо формування оптимізаційної моделі функціонування ІАС ППР у складі ДЦ з керування поїзною роботою на коліях ПЗТ.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою дослідження є розроблення методів інтелектуально-аналітичного забезпечення роботи ДЦ промислових комбінатів з позиції оптимального розподілу технологічного вантажу по основних виробничо-технологічних ланках в умовах взаємозалежних транспортних потоків. На їхніх результатах передбачається формування прикладного ПЗ систем ДЦ, що має виробляти оперативному персоналу рекомендаційні регулюючі дії через засоби ЛМІ.

**Основна частина дослідження.** Головним завданням будь-якого підприємства є мінімізація витрат і при цьому збільшення прибутку. Для вирішення цього завдання є багато методів, які використовуються на металургійних та інших заводах, одним з яких є зменшення собівартості шляхом оптимізації транспортних потоків засобами ДЦ. Отже, для оптимізації витрат на перевезення вантажної маси залізничним транспортом потрібно побудувати математичну модель транспортної мережі, яка буде описувати всі зв'язки та залежності в системі, іншими словами треба розв'язувати транспортну задачу. Щоб правильно відтворити всі взаємозв'язки, потрібно з'ясувати алгоритми та закони, за якими будуються даного роду задачі [13, 14].

Всі задачі оптимізації транспортних потоків можна розділити на два класи: задачі, у яких транспортні потоки вважаються незалежними, і задачі, у яких враховується взаємозв'язок транспортних потоків різноманітних видів. Перший клас задач вивчено достатньо докладно, і йому присвячена значна кількість робіт [8-11, 15, 16].

Проте принцип незалежності транспортних потоків не є характерним для ПЗТ, оскільки інтеграція перевезень у єдиний виробничо-технологічний цикл комбінату передбачає алгоритмізовану взаємопов'язану логіку та послідовність операцій з завантаження, вивантаження та доставки технологічного вантажу в основні цехи підприємства задля виробітку основної його продукції (металу, руди, коксохімічних матеріалів тощо). Таким чином, задача оптимізації диспетчерського керування засобами ПЗТ стосується саме другого класу відповідних задач.

Другим класом задач оптимізації транспортних потоків є задачі про взаємозалежні транспортні потоки, у яких додано умови, що відображують залежність розміру транспортного потоку одного виду, що протікає по якійсь ділянці (дузі) мережі, від розміру транспортних потоків інших видів, що протікають по цій же дузі, наприклад залежність потоку вантажів від потоку транспортних засобів, що здійснюють перевезення даних вантажів. Крім того, у цих задачах може враховуватися можливість перетворення транспортних потоків одного виду в інші. При взаємозалежних транспортних потоках математична модель більш точно описує реальний транспортний процес. Проте алгоритми розв'язання задач про взаємозалежні потоки значно складніше від алгоритмів для задач про незалежні потоки і потребують більш деталізованого опрацювання [15, 17, 18].

На практиці частіше за інші зустрічаються задачі, у яких потрібно оптимізувати два види взаємозалежних транспортних потоків: потік вантажів і потік різноманітних видів транспортних засобів, таких як вагони, локомотиви та спеціальний технологічний рухомий склад [19].

Задачі оптимізації вантажопотоків і потоків транспортних засобів можуть мати досить високу розмірність, особливо якщо йдеться про оптимальний розподіл

вантажопотоків між усіма видами транспорту. У цьому випадку доцільно використовувати не одну математичну модель, а ієрархічну систему взаємодіючих моделей, у якій модель верхнього рівня описує весь транспортний процес із використанням агрегованих показників, а моделі нижнього рівня дають детальний опис окремих складових цього процесу. Розв'язок, отриманий за допомогою агрегованої моделі, використовують для узгодження розв'язків детальних задач, а розв'язок детальних задач – для уточнення агрегованої моделі.

У ряді окремих випадків задачі про взаємозалежні потоки вдається зводити до задач про незалежні потоки, у які додано додаткові умови, що відображують у непрямій формі обмеження, накладені на потік іншого виду. Отже, для того щоб розв'язати задачу оптимізації взаємозалежних транспортних потоків, потрібно проаналізувати існуючі методи оптимізації незалежних транспортних потоків, розглянути всі можливі розв'язки транспортної задачі [20, 21].

Під назвою транспортна задача об'єднується широке коло задач з єдиною математичною моделлю. Дані задачі належать до задач лінійного програмування і можуть бути розв'язані відомим симплексним методом. Однак звичайна транспортна задача має велику кількість змінних і розв'язання її симплексним методом є громіздким, тому використання його в даному випадку є недоцільно. Також одним з найвідоміших методів при розв'язанні даних типів задач є використання графів, який і обраний у якості методу розв'язання поставленої задачі. У такому випадку моделлю залізничної транспортної мережі підприємства служить граф  $G(K, A)$ , множина вершин  $K$  якого являє собою транспортні вузли (станції, пости), а множина дуг  $A$  – ділянки шляхів переміщення транспортних потоків

(потоків рухомого складу, вантажів) із пунктів відправлення в пункти призначення. Вершини мережі відповідають пунктам завантаження та вивантаження продукції, складам для збереження вантажів і пунктам зосередження транспортних засобів. Дугам мережі приписані такі характеристики, як протяжність, пропускна спроможність, витрати на переміщення транспортних засобів і т. п. Якщо переміщення транспортних засобів між пунктами може відбуватися тільки в одному напрямку, дуга транспортної мережі називається орієнтованою, в іншому випадку – неорієнтованою [24, 25].

Для зображення вершин (або вузлів) орієнтованих і неорієнтованих дуг використовуються відповідно кружки, лінії зі стрілками і лінії без стрілок. У більшості випадків можна замінити одну неорієнтовану дугу двома орієнтованими і напроти спрямованими дугами.

У загальному випадку транспортна мережа являє собою мультиграф (граф із декількома дугами між одною парою вершин), що містить цикли.

Приклад фрагмента мережі  $G(K, A)$  наведено на рис. 1. Вершини, у яких зароджуються транспортні потоки, називаються «джерелами», а вершини, у яких вони поглинаються, – «стоками». Окремі об'єкти, що переміщуються, або «протікають», із пунктів зародження транспортних потоків у пункти їхнього поглинання, називаються «одинацями потоку». Надалі використовується символ  $k_i \in K$  для позначення вершини  $i = 1, \dots, n$  графа  $G(K, A)$  і символ  $(i, j) \in A$  для позначення орієнтованої дуги, що веде з  $k_i$ , до  $k_j$ . Упорядкована послідовність вершин і спрямованих дуг мережі  $k_1 (1, 2), k_2 (2, 3), \dots, k_{n-1} (n-1, n), k_n$  така, що кінець попередньої дуги є початком наступної і називається шляхом (або маршрутом), що веде з вершини  $k_1$  у вершину  $k_n$ .

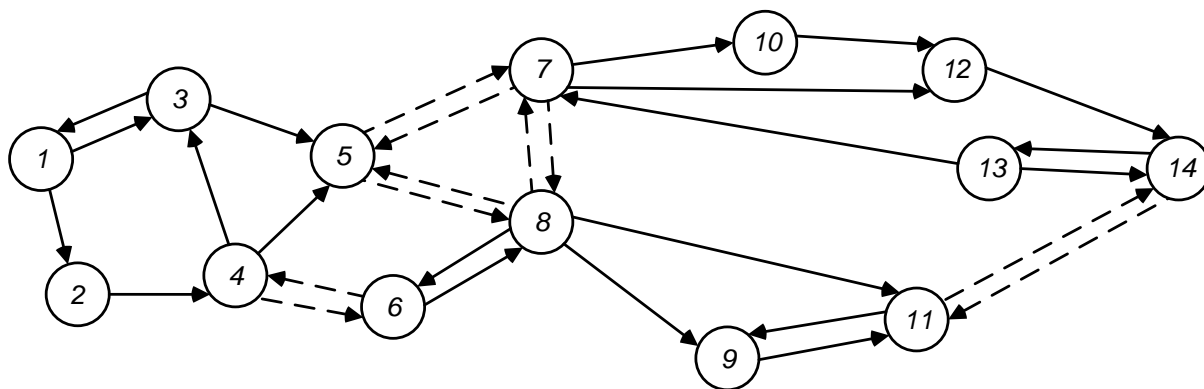


Рис. 1. Фрагмент графічної моделі транспортної мережі

При  $k_l = k_n$  послідовність називається орієнтованим циклом або кільцевим маршрутом. Якщо будь-які дві вершини мережі можна з'єднати шляхом, то мережа називається зв'язаною. Якщо мережа не є зв'язаною, то її можна розбити на зв'язані підмережі або зв'язані компоненти. Прикладом незв'язаної транспортної мережі може служити підмережі шляхів сполучень річкового транспорту, що складається з декількох нез'єднаних річкових басейнів.

Для аналізованого планового періоду відомо кількість вантажу, що потрібно відправити або доставити в ті або інші вузли мережі  $G (K, A)$ . Перевезення вантажів здійснюється по дугах  $A$  мережі, пропускні спроможності яких обмежені. Вони вимірюються кількістю вантажу або транспортних засобів, що може бути переміщене по них у період планування. На дугах, що відповідають перевезенням, ці обмеження виникають внаслідок обмежених можливостей ділянок. Для кожної дуги мережі задано розміри, що виражають питомі грошові витрати і прибутки від перевезення одиниці вантажу відповідного роду визначеним видом транспорту. Якщо даний вантаж не може перевозитися по якийсь дузі, то вартість його перевезення дорівнює достатньо великому додатному числу, а прибуток від перевезення – достатньо великому від'ємному числу. Вважається також, що задані пропускні спроможності вузлів

транспортної мережі, що є наслідком обмеженої ємності складів і власної обмеженої можливості транспортного вузла з переробки транспортних засобів і вантажів промислового використання комбінату.

Одним із найбільш характерних прикладів сфери застосування задач про взаємозалежні потоки є планування перевезень, при якому необхідно оптимізувати декілька взаємозалежних потоків на транспортній мережі: потік вантажів, що доставляються від місця видобутку до виробничих підрозділів комбінату, потік контейнерів (або тари), потік локомотивів або буксирів, що рухають транспортні засоби, якщо вони не є самохідними.

У загальному випадку ці потоки не збігаються один з одним: як правило, вони зароджуються і поглинаються в різних вузлах транспортної мережі, при цьому деякі з них можуть існувати лише на визначених ділянках.

Незважаючи на те, що існування взаємозалежних потоків на транспортній мережі є об'єктивною реальністю, цей факт не знайшов явного відображення у відомих математичних моделях перевезень. У роботах, присвячених цій проблемі, або оптимізується один із потоків, або різноманітні потоки прямо чи опосередковано відображуються один з одним. У більшості робіт розглядається окремий випадок, коли потоки вантажів зафіксовані і задача планування перевезень

зводиться до задачі оптимального розподілу транспортних засобів по напрямках перевезень. Є більш загальні задачі, у яких наявність потоку вантажів враховується непрямым поданням шляхом виділення потоків навантажених і порожніх транспортних засобів [8-11].

Сформульована задача оптимізації двох взаємозалежних потоків на мережі полягає в такому: задано спрямований граф без петель  $G(K, A)$ , де  $K$  – множина вершин,  $A$  – множина дуг, що складається з  $\overline{M}$

підграфів  $G_1^M(K_1^M, A_1^M)$ , зв'язаних загальними вершинами  $K_{01}^M$ .

По дугах графа можуть протікати два роди потоків: первинний і вторинний (рис. 2), що можна інтерпретувати, наприклад, як потік ресурсів і потік продукції, для виробництва якої вони використовуються, потік транспортних засобів і потік перевезених ними вантажів, потік носіїв інформації і потік переданої ним інформації.

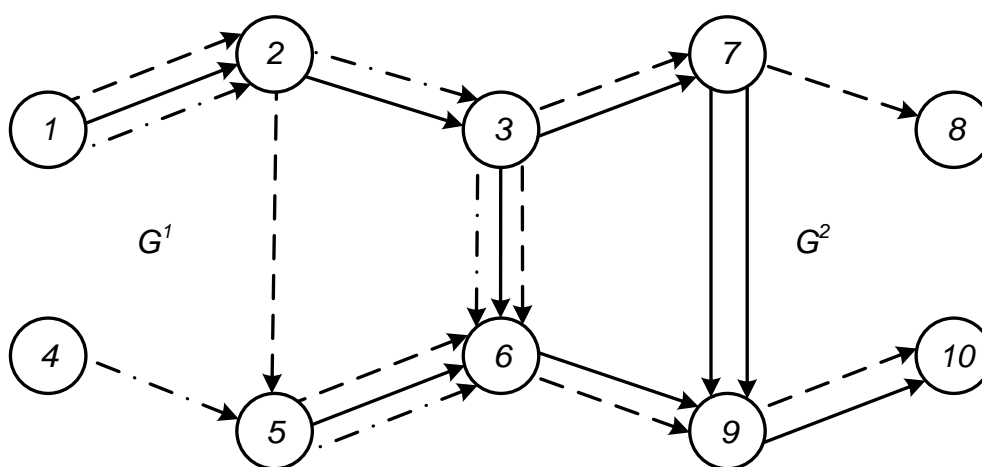


Рис. 2. Первинний і вторинний потоки

Потоки не є однорідними: на графі може існувати  $\overline{n}$  видів повторного потоку і  $\overline{m}$  типів первинного потоку. При цьому повторний потік може протікати від джерел до стоків будь-якими припустимими шляхами, тоді як кожний тип первинного потоку може існувати лише на визначеному підграфі  $G_1^M$  (відповідно до цього всі типи первинного потоку  $1, \dots, \overline{m}$  розділені на групи  $P_M, M = 1, \overline{M}$  невластивих типів).

Принциповою особливістю задачі, що відрізняє її від класичних задач про

багатопродуктові потоки, є наявність взаємозв'язку між потоками: для підтримки повторного потоку по дузі  $(i, j)$ , переміщення якого приносить «корисний ефект» («прибуток»), необхідно, щоб по ній протікав також первинний потік, що несе потік, переміщення якого пов'язано з визначеними «витратами».

Первинний потік  $\omega_{ij}^m$   $m$ -го типу по дузі  $(i, j) \in A, M = 1, \overline{M}$  складається з потоків «активної»  $\phi_{ij}^{mn}$  і «пасивної»  $\varphi_{ij}^{mn}$  складових:

$$\omega_{ij}^m = \sum_n \phi_{ij}^{mn} + \varphi_{ij}^{mn}, m \in P_M, (i, j) \in A_1^M, M = 1, \overline{M} \quad (1)$$

Розмір активної складової  $\phi_{ij}^{mn}$  первинного потоку визначає розмір повторного потоку  $x_{ij}^{mn}$  по цій дузі, наявність пасивної складової  $\phi_{ij}^{mn}$  обумовлена вимогою зберігання первинного потоку  $m$ -го виду.

Активна і пасивна складові формують, наприклад, кількість ресурсів, використовуваних при виконанні робіт, і кількість вільних ресурсів, що переміщуються з однієї роботи на іншу (зокрема кількість навантажених і порожніх транспортних засобів).

Залежність між первинним і повторним потоками виражається в тому, що розмір повторного потоку  $x_{ij}^{mn}$  по якійсь дузі  $(i, j)$  пропорційний активним складовим різноманітних типів первинного потоку, що протікають по дузі.

Залежність між первинним і повторним потоками не є взаємно однозначною:

1) той самий повторний потік може підтримуватися різноманітними комбінаціями активних складових різноманітних типів первинного потоку;

2) повторний потік може протікати від джерел до стоків будь-якими шляхами, тоді як кожний тип первинного потоку може існувати лише на визначеному підграфі;

3) у процесі свого переміщення від джерела до стоку повторний потік може підтримуватися різними типами первинного потоку, що міняються місцями в проміжних вершинах (наприклад на дузі  $(7, 2)$  (рис. 2) повторний потік підтримується активною складовою первинного потоку першого типу, а на дузі  $(2, 3)$  – активною складовою первинного потоку другого типу);

4) первинний потік може існувати й у тих дугах, у яких повторний потік відсутній (як, наприклад, у дузі  $(4, 5)$  на рис. 2).

Припускається лише часткове перетворення потоків різноманітних типів продуктів без їхнього посилення або ослаблення: відмінні від нуля і рівні

одиниці лише ті з коефіцієнтів перетворення, що зв'язують активну і пасивну складові того самого типу первинного потоку. Ці складові можуть переходити одне в одне у вершинах  $i \in K_0^M$ , наприклад на початку і по закінченні робіт (зокрема при навантаженні і розвантаженні потік порожніх транспортних засобів перетворюється в потік навантажених і навпаки) або при зміні одних ресурсів на інші. Задача полягає в знаходженні такої комбінації первинного і повторного потоків по дугах графа, яка забезпечує одержання максимального прибутку.

Також розглядається більш загальна задача про взаємозалежні потоки на мережі, у якій разом із невзаємозамінними і цілком взаємозамінними типами первинного потоку, що існують на підграфі і не перетинаються, розглядалися і частково взаємозамінні типи потоку, що існують на підграфах які мають загальні дуги. Незважаючи на свою специфічність, задачі такого роду мають цілий ряд різноманітних і важливих практичних застосувань. Вони виникають у сітковому плануванні і керуванні (коли разом із послідовністю виконуваних робіт враховуються і переміщення ресурсів), керовані виробництвом (коли оптимізується потік деталей або напівпродуктів, що проходять послідовне опрацювання, так і потік ресурсів, необхідних для цього опрацювання), керовані потоками інформації (коли розглядається як потік інформації, так і потік носіїв) і, як уже відзначалося, у плануванні роботи транспорту (коли разом із розподілом потоку вантажів по транспортній мережі оптимізуються переміщення транспортних засобів, що здійснюють перевезення цих вантажів).

Для того щоб більш наочно уявити особливості структури даної задачі, розглядається її окремий випадок, коли є лише один вид повторного потоку, а всі типи первинного потоку цілком

взаємозамінні. При цих умовах задача про два взаємозалежні потоки формулюється в такий спосіб:

$$\sum_{(i,j)} \left( c_{ij} x_{ij} - \sum_m \bar{c}_{ij}^{mn} \omega_{ij}^{mn} \right), \quad (2)$$

де  $c_{ij}$ ,  $c_{ij}^{mn}$  – корисний ефект від переміщення одиниці повторного потоку і витрати на переміщення одиниці первинного потоку  $m$ -го типу  $n = \overline{1, m}$  по дугах  $(i, j) \in A$  графа при виконанні звичайних умов зберігання кожного з потоків, що проходять через вершину і граф.

$$\sum_{(j)} x_{ij} - \sum_{(j)} x_{ji} = \delta_i^{\prime\prime}, i \in K, \quad (3)$$

$$\sum_{(j)} \omega_{ij}^{mn} - \sum_{(j)} \omega_{ij}^{mn} = \delta_i^{\text{Im}}, i \in K, m = \overline{1, m}, \quad (4)$$

$$\delta_i^{\text{Im}} = \begin{cases} \pm \gamma_{i\pm}^m, i \in K_{S\pm}^I \\ 0, i \notin K_{S\pm}^I \end{cases}, \quad (5)$$

$$\delta_i^{\prime\prime} = \begin{cases} \pm \beta_{i\pm}^m, i \in K_{S\pm}^{\prime\prime} \\ 0, i \notin K_{S\pm}^{\prime\prime} \end{cases}, \quad (6)$$

де  $\delta_i^{\text{Im}}, \delta_i^{\prime\prime}$  – попит і пропозиції для первинного і повторного потоків;

$K_{S+}^I, K_{S-}^I, K_{S+}^{\prime\prime}$  і  $K_{S-}^{\prime\prime}$  – джерела і стоки для первинного і повторного потоків відповідно;

а також обмежень на пропускну спроможність дуг

$$\sum_m \omega_{ij}^{mn} \leq u_{ij}, (i, j) \in A \quad (7)$$

і особливих обмежень, що відображують розподіл первинного потоку на активну і пасивну складові:

$$\omega_{ij}^m = \phi_{ij}^{mn} + \varphi_{ij}^{mn}, (i, j) \in A, m = \overline{1, m}, \quad (8)$$

і залежність повторного потоку від активних складових різноманітних типів первинного потоку, що забезпечує

транспортно-експедиторську діяльність на комбінаті:

$$x_{ij} = \sum_m b^m \phi_{ij}^m, (i, j) \in A. \quad (9)$$

Як бачимо, основною особливістю, що відрізняє дану задачу від звичайних задач про багатопродуктові потоки мінімальної вартості, є наявність специфічних обмежень (8), (9), що визначаються апроксиматичними відмінностями потяга:

$$x_{ij}, \phi_{ij}^m, \varphi_{ij}^m \geq 0, (i, j) \in A, m = \overline{1, m}. \quad (10)$$

Розглянута задача може бути зведена до традиційних задач про потоки в мережах лише в деяких окремих випадках. Однією з найбільш істотних умов для цього є виконання вимоги, щоб перетворення

активної складової в пасивну й навпаки відбувалося тільки в джерелах і стоках  $K_{S\pm}^I$  для повторного потоку і не припускалася передача повторного потоку від ресурсів одного типу до ресурсів іншого типу, тобто щоб розмір активної складової первинного потоку (потоку ресурсів), що підтримує повторний потік від джерела до стоку, залишався незмінним.

У цьому випадку умови зберігання повторного потоку еквівалентні умовам зберігання активної складової первинного потоку, що дає можливість не розглядати повторний потік у явному вигляді. Якщо в мережі існує лише один тип первинного потоку ( $\bar{m} = 1$ ), то задача зводиться до звичайної задачі про двопродуктовий потік  $\phi$  і  $\varphi$ :

$$\begin{aligned} & \sum_{(i,j)} [(c_{ij} - c_{ij}')\phi_{ij} - \tilde{c}_{ij}'\varphi_{ij}] \rightarrow \max, \\ & \sum_j \phi_{ji} - \sum_j \phi_{ij} = \frac{1}{b} \delta_i'', i \in K, \\ & \sum_j \varphi_{ji} - \sum_j \varphi_{ij} = \delta_i^r - \frac{1}{b} \delta_i'', i \in K, \\ & \phi_{ij} + \varphi_{ij} \leq u_{ij}, (i, j) \in A, \\ & \phi_{ij} \geq 0, \varphi_{ij} \geq 0, (i, j) \in A. \end{aligned} \quad (11)$$

В ідеальному випадку, коли пасивна складова  $\varphi$  відсутня (тобто первинний потік цілком використовується для підтримки повторного потоку) або може бути задана апріорно, аналізована задача ще більш спрощується і переходить у задачу про однопродуктовий потік  $\phi$  мінімальної вартості.

Не менш важливим є організація з використанням ДЦ взаємодії різних видів промислового транспорту на комбінаті – автомобільного і залізничного. Для цього розв'язується задача планування перевезень декількома видами транспорту. Основним напрямком підвищення ефективності роботи транспорту є поліпшення взаємодії різноманітних його

видів із метою оптимального використання наявних ресурсів.

У зв'язку з цим однією з найважливіших практичних задач є комплексне планування перевезень вантажів різноманітними видами транспорту (автомобільним, залізничним і т. д.). Оскільки ця задача полягає, з одного боку, у виборі шляхів доставки вантажів і розподілі вантажопотоків по транспортних мережах окремих видів транспорту, а з іншого боку, у виборі типів використовуваних транспортних засобів (автомобілів, вагонів і т. п.) і їхніх переміщень при виконанні перевезень, для її розв'язання можуть бути використані моделі оптимізації двох взаємозалежних потоків: потоку вантажів (повторного потоку) і потоку транспортних засобів (первинного потоку), що складається з двох складових: потоку навантажених транспортних засобів (активна складова) і потоку порожніх транспортних засобів (пасивна складова). Взаємозв'язок потоків вантажів і транспортних засобів виражається в залежності розміру потоку вантажів від розміру потоку навантажених транспортних засобів і в тому, що в пунктах навантаження-розвантаження потоки навантажених і порожніх транспортних засобів переходять один в один, а в пунктах перевалювання потік транспортних засобів одного виду транспорту переходить у потік транспортних засобів іншого виду транспорту.

Дослідивши задачі оптимізації взаємозалежних транспортних потоків, було зроблено висновок, що розв'язання транспортної задачі, а саме розподіл транспортних потоків у системі, є процесом громіздким і виходить за рамки даного дослідження, тому буде наведена модель ефективності впровадження даного проекту, якщо вважати, що модель розподілу транспортних потоків побудована та впроваджена з максимальним ефектом.



Розглянувши вирази можливих варіантів оптимізації взаємозалежних транспортних потоків, можна зробити висновок, що від оптимального розподілу потоків у мережі буде залежати щільність вантажопотоку та маса видобутку відповідно.

Система описується такими локальними параметрами: вхідними (довжиною шляху транспортування, часом транспортування – це дані, що збираються автоматично з обладнання) і вихідними (масою що переміщується, щільністю вантажопотоку та прибутком).

Для опису системи в цілому введемо залишкову функцію вантажопотоків –  $\Delta_k$  на обраному рівні як

$$\sum M_i - \sum m_j = \Delta_k, \quad (12)$$

де  $M_i$  – вхідний вантажопотік;

$m_j$  – вихідний вантажопотік.

При цьому можна вважати, що буде справедливим таке співвідношення:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + v * grad\rho, \quad (13)$$

де  $\rho$  – щільність вантажопотоку;

$v$  – швидкість переміщення вантажу у вантажопотоці.

Вираз (13) можна записати в іншому вигляді:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + v * \left( \frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\partial\rho}{\partial z} \right). \quad (14)$$

Або для одномірного випадку

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + v * \left( \frac{\partial\rho}{\partial x} \right). \quad (15)$$

В одномірному випадку можна одержати значення швидкості як

$$v = \frac{\frac{d\rho}{dt} - \frac{\partial\rho}{\partial t}}{\frac{\partial\rho}{\partial x}}, \quad (16)$$

де під  $v$  розуміється компонента швидкості в цьому ж напрямку.

Крім того, необхідно прийняти таке припущення, що буде справедливим співвідношення для цінового потенціалу  $\Delta_c$

$$\Delta_c = -b * \rho, \quad (17)$$

де  $b$  – коефіцієнт пропорційності.

Це співвідношення говорить про те, що вантажопотік потенційний.

Причому значення  $\Delta_c$  може являти собою як ціновий потенціал, так і потенціал організаційного типу.

У двомірному випадку можна зазначити, що справедливе співвідношення

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = -b * \rho. \quad (18)$$

При одному вимірі одержимо

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = -b * \rho. \quad (19)$$

У результаті справедливим буде вираз

$$\rho = -\left(\frac{1}{b}\right) * \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (20)$$

де значення  $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$  може бути заздалегідь задане у вигляді функції або виразу.

Залежність щільності вантажопотоку від відстані від центру завантаження вантажної маси наведена на рис. 3. Даний графік показує, що чим далі від центру завантаження знаходяться транспортні засоби, тим менша щільність вантажопотоку.

У свою чергу графік зміни швидкості вантажопотоку відповідно до виразів (15)–(20) набуде вигляду, показаному на рис. 4.

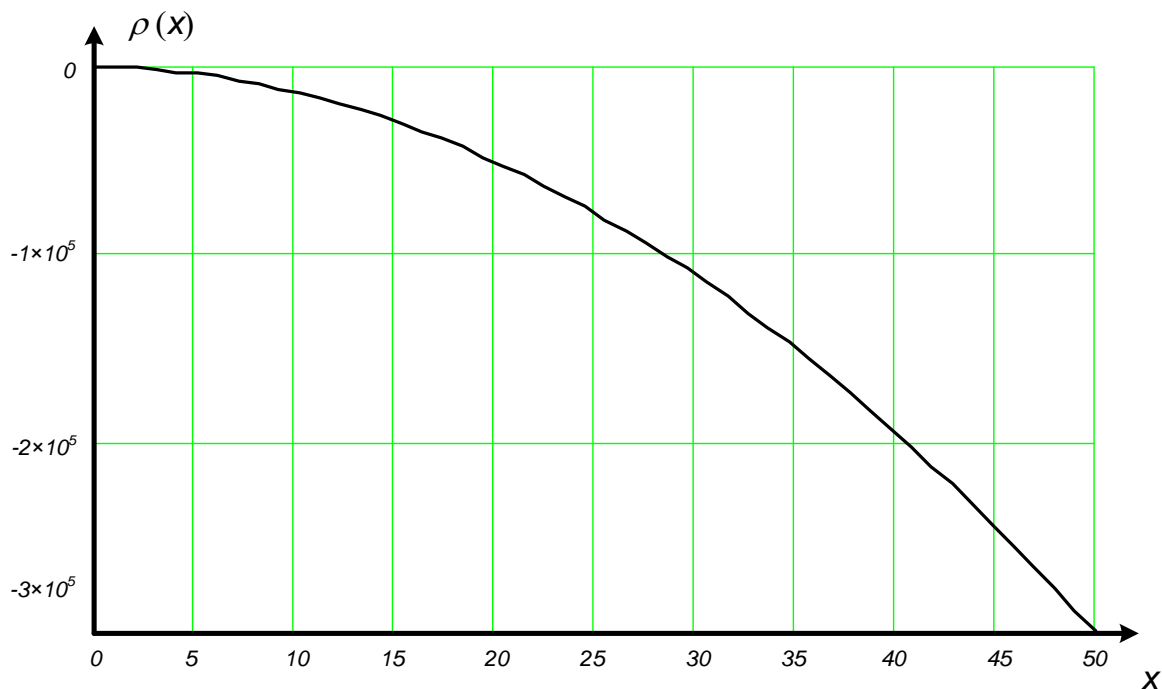


Рис. 3. Залежність щільності  $\rho(x)$  від відстані:

$\rho(x)$  – щільність вантажопотоку (т/год);  $x$  – відстань від центру завантаження (км)

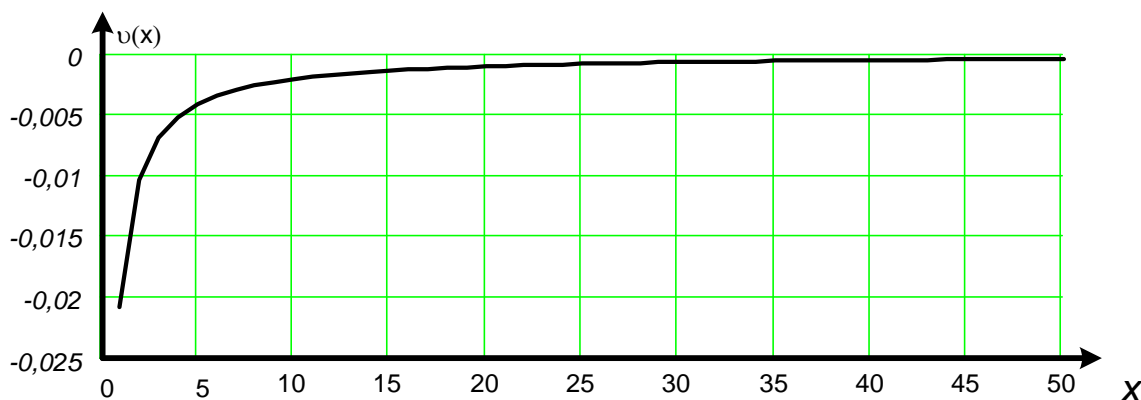


Рис. 4. Графік, що фіксує зміну швидкості вантажопотоку  $v$  залежно від координати  $x$ :

$v(x)$  – швидкість вантажопотоку, км/год;  $x$  – відстань від центру завантаження, км

Даний графік наочно відображує, що чим далі від центру завантаження розташовані транспортні засоби, тим швидше відбуваються перевезення, оскільки на шляху відбувається розвантаження і швидкість зростає.

Функція швидкості асимптотична і швидко досягає свого граничного значення.

Залежність маси вантажу від його цінового потенціалу відповідно до виразів (15)–(20) наведена на рис. 5.

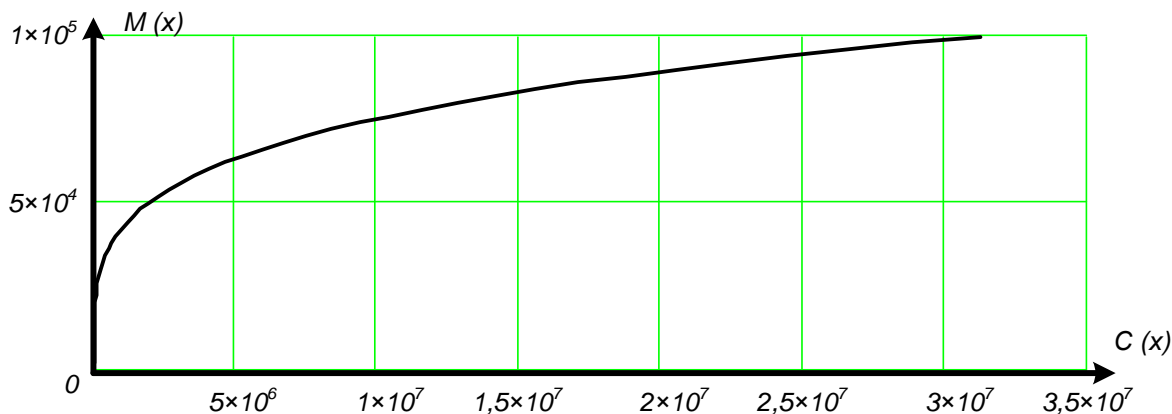


Рис. 5. Залежність розміру вантажопотоку від цінового потенціалу:  
 $M(x)$  – маса вантажу, т;  $C(x)$  – ціновий потенціал, умов. од.

Слід зазначити, що в реальних умовах швидкість переміщення будь-якого вантажу буде обмежена.

З графіка на рис. 5 можна зробити висновок, що зі збільшенням вантажопотоку зростає ціновий потенціал зразка транспортного призначення на ділянці залізничного транспорту.

Проте розв'язання рівняння (20), назване звичайним диференціальним рівнянням фізики, викликає достатньо багато труднощів, можливість розв'язання рівнянь подібного типу пов'язано з можливістю поділу змінних у спеціально обраних системах координат.

Більш реально для пошуку розв'язання обмежитися одномірним випадком або застосувати, як варіант, диференціювання по шляху.

Інший варіант рішення полягає в тому, щоб задаватися простим виразом, наприклад для  $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ , і потім знаходити розв'язок для  $\rho$  з рівняння (16).

Проте підходом до розв'язання може бути таке значення  $\rho$ , що знаходиться з рівняння (16), після чого цей вираз підставляється у відповідні рівняння, що після ряду перетворень дозволяє одержати значення швидкості  $v$  реального вантажопотоку.

Крім того, відомо, що щільність вантажопотоку можна знайти з виразу

$$\rho(x, t) = m_o \int n^\phi(x, p, t) dp, \quad (21)$$

де  $n^\phi(x, p, t)$  – фазова щільність;  
 $p$  – імпульс вантажу в потоці.

Імпульс вантажу у вантажопотоці

$$p = m_o * \dot{x}, \quad (22)$$

де  $m_o$  – маса вантажу;  
 $\dot{x}$  – швидкість вантажу.

А масу вантажу, що проходить по вантажопотоку, можна визначити як

$$M_i(m_j) = m_o \iint n^\phi(x, p, t) dp. \quad (23)$$

У цьому випадку, у загальному вигляді, ми маємо весь комплект рівнянь для визначення маси вантажопотоку і його щільності:

$$\begin{cases} \rho(x, t) = m_o \int n^\phi(x, p, t) dp \\ M_i(m_j) = m_o \iint n^\phi(x, p, t) dp \end{cases}$$

Після математичного моделювання отримаємо

$$M_{n_l, i} := \sum_{l=1}^{n_l} \left[ (-1)^{l+1} \cdot \frac{n_l! \cdot (p_i)^l}{l! (n_l - l)!} \right] p_i := \frac{i}{10} \quad i := 1, 2, \dots, 10 \quad n_l := 1 \dots 30 \quad n_l := l$$

Після того як було знайдено масу та щільність вантажу, можна підрахувати прибуток за формулою

$$P = C_{iz}^n \cdot M - C_{iz}^{mn} \cdot M, \quad (24)$$

де  $C_{iz}^n$  – ціна за 1 т технологічного вантажу;

$C_{iz}^{mn}$  – собівартість за 1 т технологічного вантажу;

$M$  – маса видобутку за 1 добу.

Сформований відповідно до виразів (15)-(24) поверхневий графік залежності вантажної маси від її щільності та віддаленості від пункту призначення наведено на рис. 6.

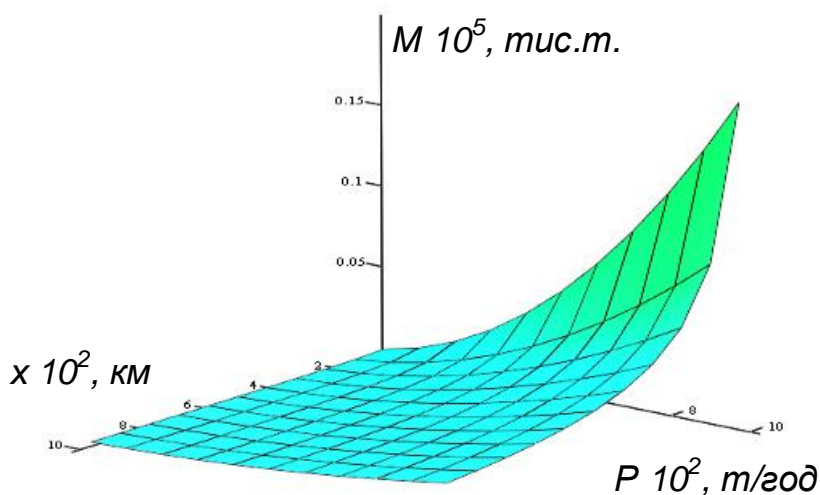


Рис. 6. Поверхневий графік залежності маси вантажу від його щільності та від координати віддалення від пункту завантаження

Отримана залежність і вирази, на підставі яких вона була сформована, при програмній реалізації дозволяють впровадити до складу ІАС ППР ДЦ функції з надання рекомендацій оперативному персоналу щодо оптимального розподілу завантаженого рухомого складу по транспортній мережі комбінату.

**Висновки.** Розроблене і вдосконалене інтелектуально-аналітичне забезпечення комп'ютерної системи ДЦ ПЗТ базується на використанні задачі оптимізації взаємозалежних транспортних потоків.

Відповідно до критерію, що встановлює максимальне ущільнення вантажної маси технологічного вантажу при мінімальному пробігу рухомого складу, розроблено математичні моделі, що реалізують у складі прикладного ПЗ системи ДЦ інтегровану в неї ІАС ППР, яка згідно з рекомендаційними впливами дозволяє оптимізувати процес керування перевезеннями технологічного вантажу на комбінаті.

Проте в дослідженні не враховано, що окремі транспортні потоки на комбінаті

можуть бути незалежними. Таким чином, подальший розвиток у даному напрямі полягає в опрацюванні незалежних транспортних потоків з подальшою

інтеграцією отриманих математичних моделей у складі ІАС ППР системи ДЦ на лініях ПЗТ.

### Список використаних джерел

1. Полякова, О. М. Логістичний підхід до взаємодії магістрального і промислового залізничного транспорту [Текст] / О. М. Полякова // Вісник економіки транспорту і промисловості. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 49. – С. 199-203.
2. Campos, J. Rail Transport Regulation [Text] / J. Campos, P. Cantos. – Washington D.C.: Economic Development Institute of the World Bank, 2017. – 66 p.
3. Corman, F. Real-time Railway Traffic Management: dispatching in complex, large and busy railway networks [Text] / F. Corman. – TRAIL Thesis Series T2010/14, the Netherlands TRAIL Research School, 2010. – 212 p.
4. Miao, Y. Research on Centralized Dispatching System of Rail Transit [Text] / Y. Miao // 2018 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). – Xiamen, Fujian, China, 2018. – P. 34-37.
5. Krasemann, J. Computational decision-support for railway traffic management and associated configuration challenges: An experimental study [Text] / J. Krasemann // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2015. – Vol. 5. – № 3. – P. 95-109.
6. Удосконалення диспетчерського керівництва дільниці на основі прогностичного моделювання перевізного процесу [Текст] / П. В. Долгополов, Т. В. Головка, Т. В. Галишинець [та ін.] // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – Вип. 49(1158). – С. 36–39.
7. Мікропроцесорна диспетчерська централізація «КАСКАД» [Текст] : навч. посібник / М. І. Данько, В. І. Мойсеєнко, В. З. Рахматов [та ін.]. – Харків : УкрДАЗТ, 2005. – 48 с.
8. Liudvinavičius, L. New possibilities of railway traffic control systems [Text] / L. Liudvinavičius, S. Dailydka, A. Sladkowski // Transport Problems. – 2016. – Vol. 11. – Iss. 2. – P. 133-142.
9. Kara, T. Design and Simulation of a Decentralized Railway Traffic Control System [Text] / T. Kara, M. Cengiz Savaş // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2016. – Vol. 6. – No. 2. – P. 945-951.
10. Distributed optimization for real-time railway traffic management [Text] / X. Luan, B. D. Schutter, T. Boom [and oth.] // IFAC PapersOnLine 51-9. – 2018. – P. 106-111.
11. Ajanović, Z. A novel model-based heuristic for energy-optimal motion planning for automated driving [Text] / Z. Ajanović, M. Stolz, M. Horn // IFAC PapersOnLine 51-9. – 2018. – P. 255-260.
12. Rupp, A. Decentralized Cooperative Merging using Sliding Mode Control [Text] / A. Rupp, M. Stolz, M. Horn // IFAC PapersOnLine 51-9. – 2018. – P. 349-354.
13. Білявський, В. М. Організація системи диспетчеризації операційної діяльності підприємств [Текст] / В. М. Білявський // Вісник Львівської комерційної академії. – 2014. – № 45. – С. 27–32.
14. Калінін, О. В. Операційний менеджмент якості на підприємствах в межах реалізації його інноваційного розвитку [Текст] / О. В. Калінін // Теоретичні і практичні аспекти економіки та інтелектуальної власності. – 2013. – Вип. 2 (1). – С. 218–224.
15. Rota, B. Traffic Flow Optimization on Freeways [Text] / B. Rota, M. Simic // Procedia Computer Science. – 2016. – Vol. 96. – P. 1637-1646.

16. BotMiner: Clustering Analysis of Network Traffic for Protocol- and Structure-Independent Botnet Detection [Text] / G. Gu, R. Perdisci, J. Zhang [and oth.] // USENIX Association. 17th USENIX Security Symposium. – 2008. – P. 139-154.
17. Loiseau, P. A Long-Range Dependent Model for Network Traffic with Flow-Scale Correlations [Text] / P. Loiseau, P. Primet, P. Gonçalves // Stochastic Models. – 2011. – Vol. 27. – Iss. 2. – P. 333-361.
18. Cremer, M. A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations [Text] / M. Cremer, J. Ludvig // Mathematical Computer Simulation – 1986. – Vol. 28. – P. 297–303.
19. Скалозуб, В. В. Многокритериальные модели задачи анализа транспортных сетей с учетом специализированных свойств носителей потоков [Текст] / В. В. Скалозуб, Л. А. Паник // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4. – С. 15-21.
20. Гюльштейн, Е. Г. Задачи линейного программирования транспортного типа [Текст] : учеб. для вузов / Е. Г. Гюльштейн, Д. Б. Юдин. – М. : Наука, 1969. – 384 с.
21. Жалак, М. І. Основи теорії і методів оптимізації [Текст] : навч. посібник / М. І. Жалак, Ю. В. Триус. – Черкаси : Брама-Україна, 2005. – 608 с.
22. Кустов, В. Ф. Экспериментально-статические модели распределённых технологических объектов [Текст] / В. Ф. Кустов, А. Ю. Каменев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 2. – С. 97-101.
23. Development and investigation of methods of graphic-functional modeling of distribute systems [Text] / A. Boinik, O. Kameniev, A. Lapko [and oth.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkov: Tech-nology Center, 2018. – № 4/4(94). – P. 59-69.
24. Каменев, О. Ю. Варіанти організації диспетчерського контролю об'єктів залізничної транспортної мережі [Текст] / О. Ю. Каменев // Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті – ЭКУЗТ-2015: матеріали Х Ювілейної МНПК, 30 червня – 1 липня 2015 р., м. Одеса. – К. : ДЕДУТ, 2015. – С.64-65.
25. Сигорский, В. П. Математический аппарат инженера [Текст] / В. П. Сигорский. – 2-е изд., стереотип. – К. : Техника, 1977. – 768 с.

---

Каменев Александр Юрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-32.

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

Лапко Антон Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-32.

E-mail: a.o.lapko@kart.edu.ua.

Щебликіна Олена Вікторівна, аспірант кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-32. E-mail: sov@kart.edu.ua.

Лазарев Олексій Владленович, старший викладач кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-32.

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

Ушаков Михайло Віталійович, старший викладач кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-32.

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

---

Каменев Александр Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Тел.: (057) 730-10-32. E-mail: alexstein@kart.edu.ua.

Лапко Антон Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Тел.: (057) 730-10-32. E-mail: a.o.lapko@kart.edu.ua.

Щеблыккина Елена Викторовна, аспирант кафедры автоматики и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-32.

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

---

Лазарев Алексей Владленович, старший преподаватель кафедры автоматизации и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.  
Тел.: (057) 730-10-32. E-mail: lazal@kart.edu.ua.

Ушаков Михаил Витальевич, старший преподаватель кафедры автоматизации и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта  
Тел.: (057) 730-10-32. E-mail: micush@kart.edu.ua.

Kameniev Oleksandr Jurijovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-32.  
E-mail: alexstein@kart.edu.ua.

Lapko Anton Oleksandrovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-32.  
E-mail: a.o.lapko@kart.edu.ua.

Shcheblykina Olena Viktorivna, postgraduate student, Department of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-32. E-mail: sov@kart.edu.ua.

Lazariev Oleksii Vladlenovych, senior lecturer, Department of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-32. E-mail: lazal@kart.edu.ua.

Ushakov Mychailo Vitalijovych, senior lecturer, Department of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-32. E-mail: micush@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 28.12.2018 р.

**ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)**

---

УДК 629.46-027.45(043.5)

**АДАПТИВНІ БАЙЄСІВЬКІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ  
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ НА ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ**

Доктори техн. наук С. В. Мямлін, В. В. Скалозуб, канд. техн. наук Л. А. Мурадян

**АДАПТИВНЫЕ БАЙЕСОВСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
НАДЕЖНОСТИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

Доктора техн. наук С. В. Мямлін, В. В. Скалозуб, канд. техн. наук Л. А. Мурадян

**ADAPTIVE BAYESIAN MODELS FOR EVALUATING THE INDICATORS OF THE  
RELIABILITY OF FREIGHT CARS ON THE STAGES OF THE LIFE CYCLE**

D. Sc. (Tech.) S. V. Myamlin, D. Sc. (Tech.) V. V. Skalozub, PhD (Tech.) L. A. Muradian

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.182.2018.160515>

---

*У статті розглядається обґрунтування правомірності застосування байєсівської моделі (БМ) для розрахунків показників надійності вантажного вагона на етапах життєвого циклу. На підставі експериментальних даних були визначені показники надійності деталей і вузлів вантажних вагонів. Методика, що представлена, дозволяє використовувати адаптовані БМ для оцінювання показників надійності вантажного вагона на етапах життєвого циклу, а також оптимізувати міжремонтний термін і кількість ремонтів протягом життєвого циклу моделі вагона, при цьому забезпечується облік конструктивних особливостей.*

**Ключові слова:** вагон, надійність, вірогідність безвідмовної роботи, відмова, механічний знос, втомне руйнування, життєвий цикл, теорія Байєса, індивідуальна модель вагона.

*В статье рассматривается обоснование правомерности применения байесовской модели (БМ) для расчетов показателей надежности грузового вагона на этапах жизненного цикла. На основании экспериментальных данных были определены показатели надежности деталей и узлов грузовых вагонов. Представленная методика позволяет использовать адаптированные БМ для оценки показателей надежности грузового вагона на этапах жизненного цикла, а также оптимизировать межремонтный срок и количество ремонтов в течение жизненного цикла модели вагона, при этом обеспечивается учет конструктивных особенностей.*

**Ключевые слова:** вагон, надежность, вероятность безотказной работы, отказ, механический износ, усталостное разрушение, жизненный цикл, теория Байеса, индивидуальная модель.

*The article discusses the rationale for the application of the Bayesian model (BM) for calculating the reliability indicators of a freight car at the stages of its life cycle. The life cycle includes such stages as the creation, production, operation, repair and utilization of the car. Each*



of the stages, in turn, consists of several operations and procedures. So, for example: the design phase begins with pre-design solutions and ends with the creation of the car; the production phase - from production to decommissioning, and the operation and maintenance phase - from the start of operation to the disposal of the car. BM allows to evaluate a posteriori (after the implementation of actions) probable hypothesis, if the facts on the implementation of certain actions have become known.

The work investigated the fulfillment of requirements for incompatibility of action groups (controlled processes), the data of which are used in models of adaptation of system parameters that control the reliability indicators of cars. A freight wagon is considered, in the nodes (wheel sets) of which mechanical wear and fatigue damage occur. For the study, the mileage of 160 thousand km was taken into account, since within these limits the indicated damages are independent, and the approximation error is an acceptable 16 %, which ensures the application of the Bayesian approach.

On the basis of experimental data, indicators of reliability of parts and components of freight cars were determined. The calculated reliability indicators and the developed individual scheme of the freight car model allowed us to construct the failure-proof matrix of individual elements and nodes of gondola cars 12-7023 for different operating times (runs). Analyzing the elements of the matrix, the vulnerable parts and assemblies of the gondola cars were identified, changes in the design of the cars were recommended, the overhaul run or repair time was increased.

The usage of adapted BM models according to the presented methodology allows assessing the reliability indicators at the stages of the life cycle, optimizing the turnaround time and number of repairs during the life cycle of the car model, while ensuring that structural features are taken into account, as well as the probabilities of failure-free operation of the wagon-bearing elements and components.

**Keywords:** car, reliability, probability of failure-free operation, failure, mechanical performance, fatigue failure, life cycle, Bayes theory, individual model of the car.

**Вступ.** Створення нового вагона – складний і тривалий процес, у якому беруть участь вчені, конструктори, дизайнери, випробувачі, фахівці з виробництва і експлуатації. Життєвий цикл вагона (ЖЦВ) являє собою сукупність взаємопов'язаних процесів створення та послідовної зміни стану систем вагона, розпочинаючи від формування вихідних вимог до закінчення експлуатації. Згідно з Єдиною системою державного управління якістю продукції життєвий цикл прийнято ділити на стадії – частини життєвого циклу, що встановлюються в нормативно-технічній документації і характеризуються певним станом вагона, видом передбачених робіт і їхніми результатами [1].

У подальшому вважаємо, що ЖЦВ включає етапи створення, виробництва і експлуатації, кожен з яких має свої особливості і містить моделі, що

складаються з таких операцій і процедур: етап створення починається з передпроектних досліджень і закінчується створенням вагона; етап виробництва включає постановку на виробництво, виробництво і зняття вагона з виробництва; на стадії експлуатації реалізується, підтримується і відновлюється якість вагона; етап утилізації передбачає зняття вагона з експлуатації і списання.

Визначення показників надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу є, безумовно, актуальною науково-прикладною проблемою для залізничного транспорту України, вирішення якої надасть можливість створити раціональну систему технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів з урахуванням їхнього технічного стану, а також підвищити рівень безпеки руху та зменшити експлуатаційні витрати.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У вагонному господарстві важливим завданням є визначення прогнозу експлуатаційного ресурсу вагона, що дозволяє проводити коригування показників надійності на певних етапах життєвого циклу. У свою чергу оцінки ресурсу можуть позначитися на системі технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів. Формування прогнозованого ресурсу ґрунтується на оцінюванні показників надійності. Стандарт РД 50-890 встановлює методи визначення показників надійності залежності від плану спостережень [2, 3]. Він є складовою частиною комплексу стандартів щодо збору та обробки інформації про надійність. Зміна показників може вплинути на систему технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів. Відповідно до положень РД 50-890 під оцінками показників надійності розуміють точкову або інтервальну оцінку показника. При цьому для оцінювання показників надійності вагона необхідно виконати таке: обрати план випробувань на надійність,

провести планування випробувань, зібрати і опрацювати необхідну інформацію. Основні дані про надійність вагонів формуються під час експлуатації, які піддаються в подальшому статистичній обробці та аналізу.

Ґрунтуючись на роботи [4, 5], основні напрямки в дослідженні надійності рухомого складу стосувалися як окремих вузлів, так і одиниць рухомого складу в цілому (локомотивів, вагонів). Крім того, досліджувалися питання про оптимізацію міжремонтного пробігу як за часом, так і за напрацюванням (пробігом). Але в даних роботах методи засновані на марковських процесах, тобто не враховуються умови роботи одиниць рухомого складу до початку проведення досліджень.

В основу отримання показників надійності, безумовно, покладено збір та оброблення статистичних даних про відмови. На етапі експлуатації також можуть виявлятися недоліки проектування і виробництва вагона. Між етапами життєвого циклу вагона існує взаємозв'язок, що зображено на рис. 1.



Рис. 1. Етапи життєвого циклу вантажного вагона

Зворотні зв'язки (рис. 1) відображують можливі послідовності процесів протягом життєвого циклу вагона.

Основною метою збору статистичних даних є визначення показників надійності вантажних вагонів на основі виявлення вузлів і деталей, які лімітують напруження до ремонту [6]. Методика збору експериментальних даних про показники надійності в процесі експлуатації рухомого складу повинна забезпечувати вчасне отримання повних, об'єктивних і достовірних даних про відмови та їхню оперативну обробку, координацію заходів щодо підвищення надійності, які проводяться проектними організаціями, заводами-виробниками і експлуатуючими організаціями. Дослідженню чинників зносу і пов'язаних з ним фізичних ефектів, які впливають на оцінювання показників надійності, присвячено багато наукових праць [7].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою нашої статті є обґрунтування байєсівської моделі (БМ) оцінювання показників надійності вантажного вагона на всіх етапах життєвого циклу [8], тобто визначення правомірності застосування БМ для розрахунків показників надійності вагонів або встановлення умов, коли комплекс передумов методу забезпечується в достатньому для практики ступені. БМ дозволяє оцінювати апостеріорні (післяреалізаційні події) імовірності гіпотези, якщо стали відомими факти щодо реалізації певних подій, а саме [9]

$$P(B_k | A) = \frac{P(B_k) \cdot P(A | B_k)}{\sum_i P(B_i) \cdot P(A | B_i)}, k = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

$$MД[h : e_1, e_2] = MД[h : e_1] + MД[h : e_2](1 - MД[h : e_1]). \quad (4)$$

У системі оцінювання надійності вагонів адаптація параметрів моделі

де  $B_k$  – попарно несумісні події, разом з якими реалізується подія  $A$ , причому вважаються відомими події  $P(B_k)$ , а також умовні ймовірності  $P(A|B_i)$ .

На підставі БМ обираються рішення з мінімальним середнім ризиком результатів (розпізнавання відмови, стану системи в процесі експлуатації тощо).

Нашим завданням є дослідження виконання вимог несумісності груп подій (контрольованих процесів), дані про які використовуються в моделях адаптації параметрів систем, що оцінюють показники надійності вагонів.

**Основна частина дослідження.** В адаптивних моделях оцінювання надійності вантажних вагонів формула (1) реалізується як [10]

$$P(h|e_1 \wedge e_2) = \frac{P(e_1 \wedge e_2|h)P(h)}{P(e_1 \wedge e_2)}, \quad (2)$$

де  $h$  – гіпотеза;

$e_1$  – ознака, яка свідчить на користь гіпотези  $h$ ;

$e_2$  – ознака, яка свідчить проти гіпотези  $h$ .

Ознаки  $e_k$  ( $k=1, 2, \dots$ ) формуються за рахунок експертного оцінювання даних про відмови вантажних вагонів певних типів на етапах ЖЦВ.

На підставі експлуатаційних даних параметри моделі (2) змінюються таким чином:

$$KB[h:e] = MД[h:e] - MНД[h:e], \quad (3)$$

де  $KB[h : e]$  – впевненість у гіпотезі  $h$  з урахуванням ознаки  $e$ ;

$MД[h : e]$  – міра довіри до гіпотези  $h$  при заданій ознаці  $e$ ;

$MНД[h : e]$  – міра недовіри  $h$  при ознаці  $e$ ;

виконується шляхом переоцінки за формулою (1) коефіцієнтів (3) за критерієм

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n KB[h_i : e_j] \rightarrow \max \Big|_{n \rightarrow 0}. \quad (5)$$

Таким чином, параметри моделі оцінювання надійності вибирається так, щоб максимізувати функціонал (5). У формулі (5) показник  $[h_i : e_j]$  визначає міри довіри  $MD$  або недовіри  $MND$  вхідних даних, отриманих у процесах експлуатації.

Рівняння (4) встановлює міри достовірності гіпотез при декількох несумісних ознаках.

Дослідимо завдання оцінювання несумісності подій, контрольованих при відмовах вагонів. Розглянемо вантажний вагон, у вузлах (колісних парах) якого виникає механічний знос (рис. 2, а) і зміна фізико-механічних характеристик (рис. 2, б) – втомне руйнування. Наведені залежності ймовірності відмови від часу побудовані на основі обробки середньостатистичних даних по відмовах (6) вантажних вагонів ПАТ «Укрзалізниця» [11] з використанням методу раннього попередження [12–14].

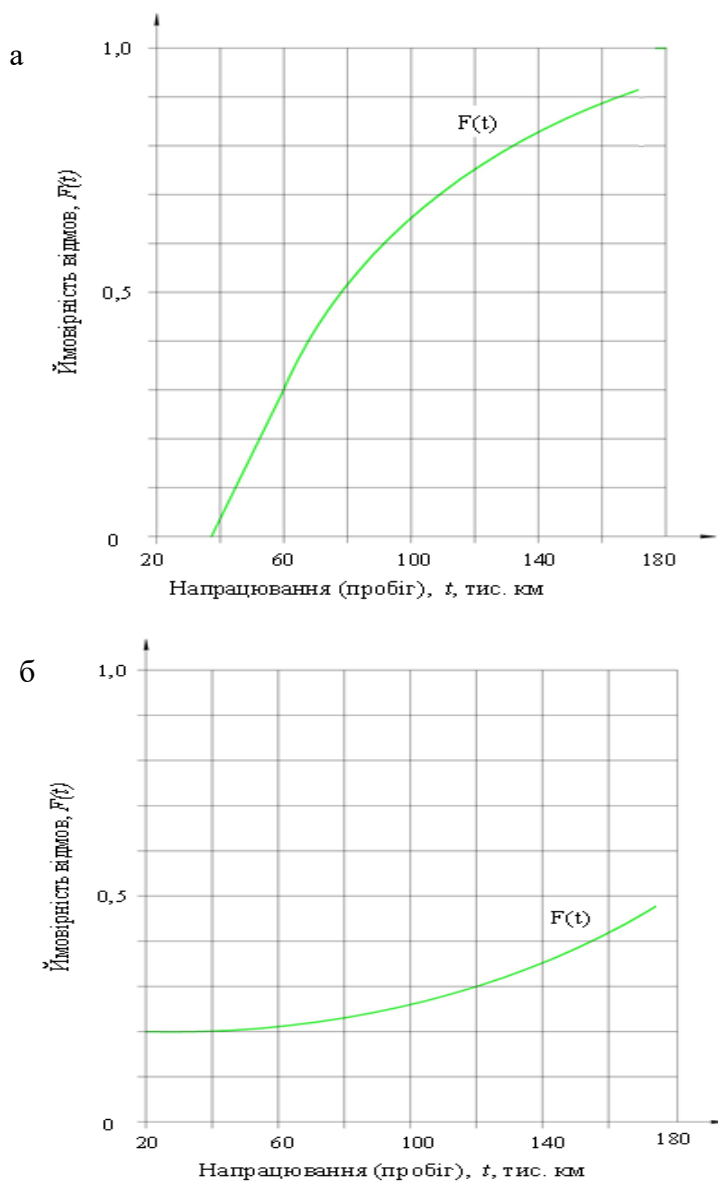


Рис. 2. Залежності ймовірності відмов вузлів вантажних вагонів (колісних пар) від пробігу: а – механічний знос; б – втомне руйнування

$$F(t) = \frac{n(t)}{N_o}, \quad (6)$$

де  $N_o$  – початкова кількість об'єктів;

$n(t)$  – кількість об'єктів, які відмовили за період напрацювання (пробігу).

Для дослідження, наскільки ці моделі руйнування вузла є незалежними, візьмемо залежність імовірності кожного типу відмови від пробігу (напрацювання) у межах 160 тис. км.

У зазначеній області середня похибка при апроксимації зв'язків відмов як незалежних становить 16 %, тобто має прийнятну для практики похибку, що

забезпечує застосування байєсівського підходу. Практично оцінимо середню величину ймовірності добутку відмов.

У подальшому використовуємо розглянутий метод БМ для дослідження зміни показників надійності вантажного вагона в експлуатації.

Зупиняємося на питаннях побудови моделей розрахунку оцінок надійності вантажних вагонів. Вважаємо, що вантажний вагон складається з п'яти основних вузлів: кузов, рама, ударно-тягові пристрої, гальмівне обладнання, ходові частини. Кожен з вузлів у свою чергу складається з окремих вузлів і деталей. Побудуємо загальну структурну схему вантажного вагона (рис. 3).

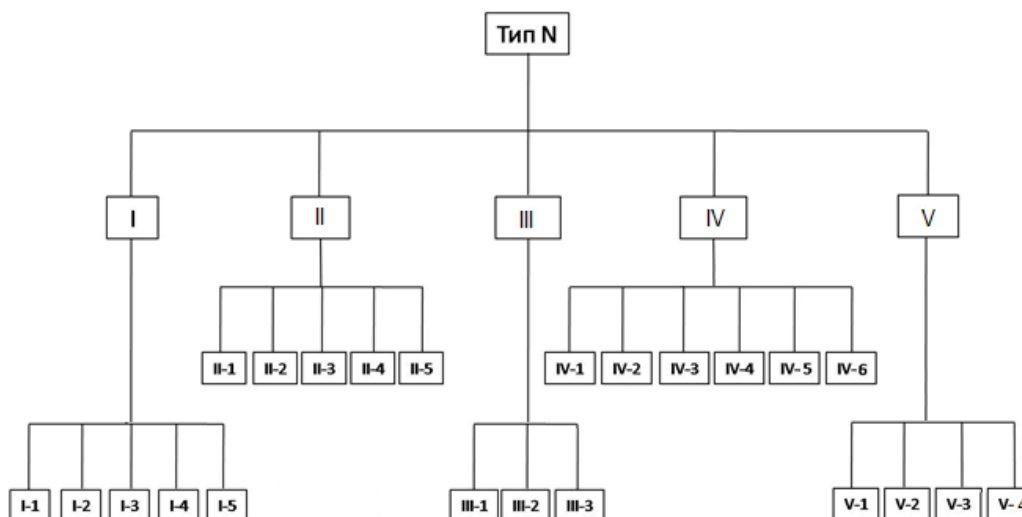


Рис. 3. Структурна схема моделі вагона N-го типу:  
I – візки; II – гальмівне обладнання; III – ударно-тягові пристрої;  
IV – кузов; V – рама

Для дослідження конкретних моделей вагонів структурна схема будується індивідуально.

У якості демонстрації сутності формування індивідуальної схеми напіввагона на рис. 4 представлено одну зі складових частин напіввагона моделі 12-732, візок моделі 18-100. Складовою частиною візка моделі 18-100 є буксовий вузол. Букса – це

система, що складається з двадцяти одного змішано з'єднаних елементів: корпус букси, лабіринтове кільце, підшипник задній, підшипник передній, кріпильна кришка, шість болтів, шість шайб, оглядова кришка, гумова прокладка, торцева гайка, стопорна планка. Індивідуальна схема серійного буксового вузла на роликівих підшипниках подана на рис. 5.

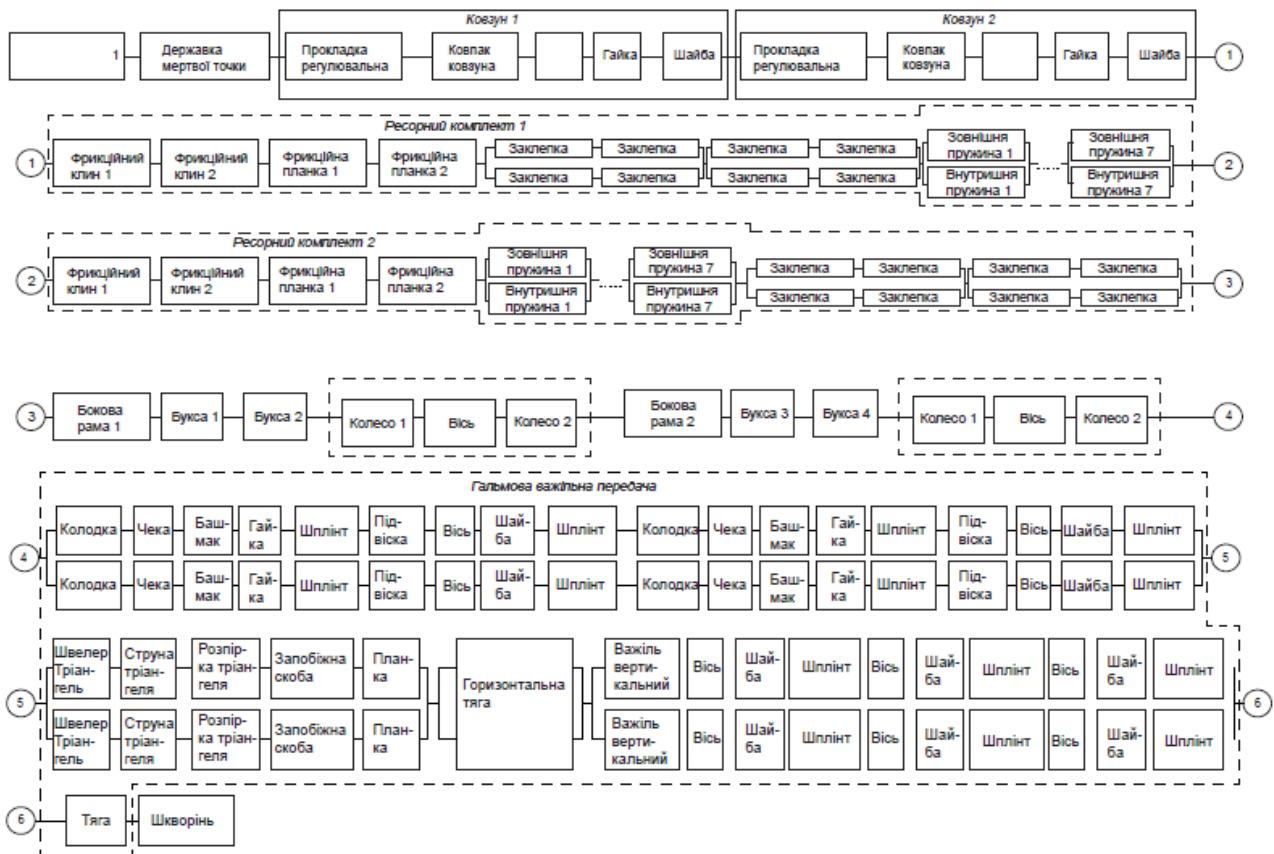


Рис. 4. Індивідуальна схема серійного візка моделі 18-100

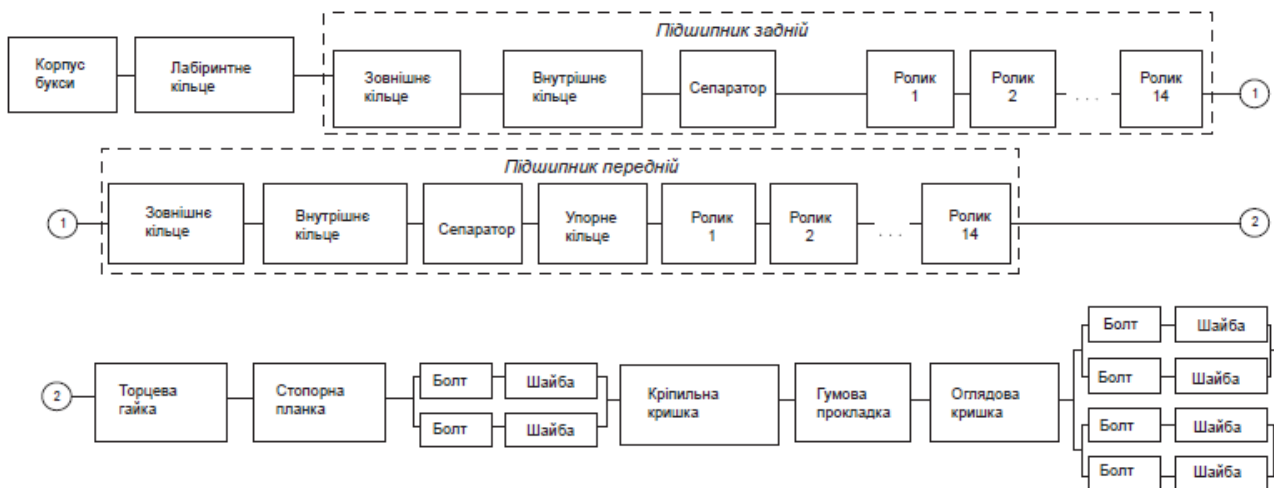


Рис. 5. Індивідуальна схема вагонної букси з роликовими підшипниками

Так само була побудована індивідуальна схема напіввагона моделі 12-7023, що дозволило з урахуванням експериментальних даних оцінити

показники надійності даного напіввагона на візках моделей 18-7020, 18-7055.

У таблиці наведені нормативні [15, 16] і розрахункові коефіцієнти відмов уніфіко-

ваних складових частин і елементів стосовно конструкції напіввагона моделі 12-7023. Розрахункові коефіцієнти визначались на основі експериментальних даних, що були отримані співробітниками ГНДЛ «Вагони»

ДІТу на дослідному маршруті «Роковата-Ужгород-Кошице» [17] після чотирьох і восьми років підконтрольної експлуатації напіввагонів моделі 12-7023 як на візках моделей 18-7020, так і на візках 18-7055.

Таблиця

Коефіцієнти (частки) відмов уніфікованих складових частин  $\Delta\bar{\omega}_i$  та елементів  $\Delta\bar{\omega}_{ji}$  напіввагона моделі 12-7023

Номер з/п	Найменування розрахункової частини та елемента	Нормативні дані		Розрахункові величини			
		$\Delta\bar{\omega}_i$ ( $1/10^{5km}$ )	$\Delta\bar{\omega}_i$ ( $1/10^{5km}$ )	На візках моделі 18-7020		На візках моделі 18-7055	
				4 р. ( $1/10^{5km}$ )	8 р. ( $1/10^{5km}$ )	4 р. ( $1/10^{5km}$ )	8 р. ( $1/10^{5km}$ )
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1-0</b>	<b>Візок</b>	<b>0,45</b>	-	<b>0,1900</b>	<b>0,2550</b>	<b>0,2310</b>	<b>0,3860</b>
1-1	Колісна пара	-	0,6400	0,3200	0,5210	0,4600	0,6010
1-2	Букса	-	0,3500	0,0080	0,0120	0,0460	0,0820
1-3	Бокова рама	-	0,0010	0,0005	0,0008	0,0008	0,0009
1-4	Надресорна балка	-	0,0012	0,0008	0,0009	0,0011	0,0012
1-5	Ресорний комплект	-	0,0073	0,0070	0,0071	0,0064	0,0070
<b>2-0</b>	<b>Гальмівне обладнання</b>	<b>0,10</b>	-	<b>0,0110</b>	<b>0,0120</b>	<b>0,0140</b>	<b>0,0180</b>
2-1	Триангель	-	0,0500	0,0460	0,0480	0,0410	0,0480
2-2	Башмак-підвіска	-	0,0900	0,0600	0,0730	0,0580	0,0729
2-3	Важільна передача	-	0,0400	0,0230	0,0340	0,0230	0,0340
2-4	Гальмівні пристрої	-	0,1300	0,0700	0,0820	0,0700	0,0820
2-5	Трубопровід, рукава, арматура	-	0,6400	0,09	0,219	0,091	0,222
<b>3-0</b>	<b>Ударно-тягові пристрої</b>	<b>0,08</b>	-	<b>0,0162</b>	<b>0,0231</b>	<b>0,0160</b>	<b>0,0230</b>
3-1	Корпус автозчепу в зборі	-	0,7500	0,4200	0,5100	0,4200	0,5130
3-2	Тяговий хомут і клин	-	0,0200	0,0140	0,0150	0,0136	0,0149
3-3	Поглиналильний апарат	-	0,2300	0,1200	0,1800	0,1200	0,1800
<b>4-0</b>	<b>Кузов</b>	<b>0,36</b>	-	<b>0,0800</b>	<b>0,2008</b>	<b>0,0820</b>	<b>0,2000</b>
4-1	Стійки шворневі	-	0,0200	0,0100	0,0140	0,0100	0,0141
4-2	Стійки кутові	-	0,1000	0,2300	0,3300	0,2300	0,3290
4-3	Стійки проміжні	-	0,0300	0,0200	0,0260	0,0210	0,0260
4-4	Двері торцеві	-	0,5000	0,3800	0,4800	0,3760	0,4800
4-5	Люки розвантажувальні	-	0,2300	0,1500	0,2200	0,1500	0,2186
4-6	Верхня об'язка та інші пристрої	-	0,1200	0,0900	0,1100	0,0890	0,1120
<b>5-0</b>	<b>Рама</b>	<b>0,01</b>	-	<b>0,0040</b>	<b>0,0070</b>	<b>0,0040</b>	<b>0,0680</b>
5-1	Балка хребтова в складанні	-	0,010	0,0028	0,003	0,0030	0,0030
5-2	балки шворневі	-	0,600	0,0500	0,056	0,050	0,0590
5-3	П'ятники і підп'ятники	-	0,1300	0,1110	0,118	0,1170	0,1250
5-4	Брус лобовий і поперечні балки	-	0,2500	0,095	0,125	0,094	0,1250

За схемами рис. 3–5, ураховуючи послідовно-паралельні зв'язки елементів, можна розрахувати загальні оцінки показників надійності вузлів і моделі вагона в цілому. На підставі отриманих експериментальних даних було побудовано матрицю, яка складається з п'яти рядків (за кількістю основних вузлів вагона). Кожний

рядок матриці містить імовірності безвідмовної роботи окремих елементів вузлів вагона. Покажемо на прикладі напіввагона моделі 12-7023, як буде змінюватись матриця впродовж експлуатації. Для напіввагона моделі 12-7023 після 4 років експлуатації матриця буде мати такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} 0,9984 & 0,9979 & 0,9985 & 0,9967 & 0,9987 \\ 0,9999 & 0,9974 & 0,9989 & \mathbf{0,9964} & 0,9983 \\ 0,9987 & 0,9978 & 0,9984 & 0,9968 & 0,9981 \\ 0,9981 & 0,9979 & 0,9988 & 0,9967 & 0,9982 \\ 0,9984 & 0,9989 & 0,9983 & 0,9968 & 0,0000 \\ 0,9983 & 0,0000 & 0,9982 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,9988 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Значення в матриці отримано при середньостатистичній обробці різних елементів напіввагонів моделі 12-7023, використовуючи правила і теореми теорії ймовірностей; середній розкид значень вимірюваних характеристик був у межах  $\pm 7\%$ . Будемо оцінювати надійність на

основі найгіршої ланки. Тоді ймовірність безвідмовної роботи нового напіввагона моделі 12-7023 дорівнює  $P = 0,9964$ .

Для напіввагона моделі 12-7023 після 8 років експлуатації матриця показників надійності буде мати такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} 0,9872 & 0,9912 & 0,9902 & 0,9912 & 0,9948 \\ \mathbf{0,9843} & 0,9923 & 0,9901 & 0,9922 & 0,9954 \\ 0,9857 & 0,9931 & 0,9899 & 0,9918 & 0,9957 \\ 0,9868 & 0,9934 & 0,9892 & 0,9923 & 0,9959 \\ 0,9875 & 0,9939 & 0,9887 & 0,9921 & 0,0000 \\ 0,9874 & 0,0000 & 0,9894 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,9848 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Наведені значення отримано аналогічно тому, як і в попередній матриці. Імовірність безвідмовної роботи напіввагона моделі 12-7023 після 8 років експлуатації буде дорівнювати  $P = 0,9843$ . Таким чином, на зниження загальної ймовірності безвідмовної роботи напіввагона моделі 12-7023 значно впливають деталі візка (перший стовпчик). Використання візків моделі 18-7055 менш доцільне порівняно з візками моделі 18-7020 (у даному випадку  $P = 0,967$ ).

Підтримувати рівень надійності вагона на необхідному рівні можна, змінюючи чи модернізуючи окремі ресурсовизначальні складові відповідного вузла. Для цього використовують наведені дані матриці для ресурсовизначальних елементів вузлів вагона – окремо дані кожного стовпця. За рахунок цього можна також досягти підвищення рівня безпеки руху поїздів. Результати проведених досліджень показали, що використання візків моделі 18-7020 на напіввагонах



моделі 12-7023 є більш доцільним і виправданим.

Як підсумок, наведемо структуру ремонтів для напіввагона моделі 12-7023 з

візками моделей 18-7055 та 18-7020 у вигляді, поданому на рис. 6.

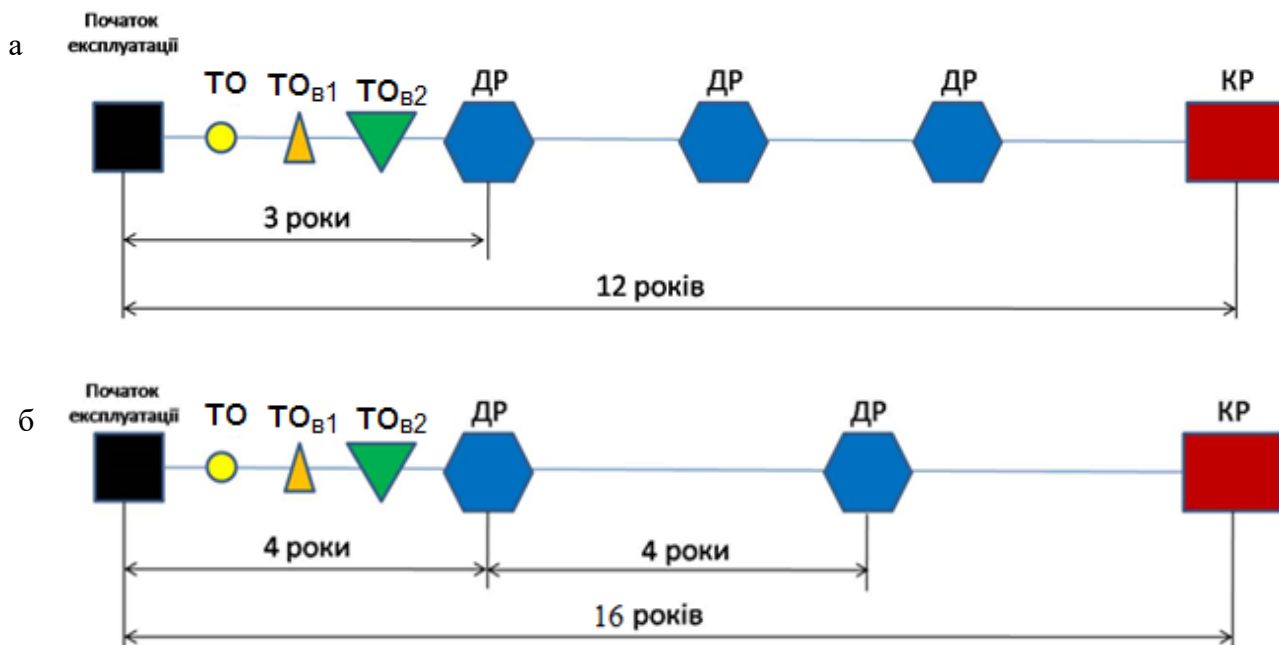


Рис. 6. Структура ремонтів напіввагона моделі 12-7023 з візками моделей:  
а – 18-7055; б – 18-7020

Система технічного обслуговування і ремонтів вантажних вагонів передбачає виконання таких видів робіт: **ТО**, **ТО<sub>В1</sub>**, **ТО<sub>В2</sub>** – технічне обслуговування вагонів з відчепленням і без відчеплення, як порожніх, так і завантажених; **ДР**, **КР** – плановий ремонт відповідно деповський і капітальний.

**Висновки.** Використання адаптованих БМ моделей за поданою методикою дозволяє оцінити показники надійності на етапах життєвого циклу, оптимізувати міжремонтний термін і кількість ремонтів впродовж життєвого циклу моделі вагона, при цьому забезпечується урахування конструктивних особливостей, а також імовірностей безвідмовної роботи ресурсовизначальних елементів вузлів вагонів.

### Список використаних джерел

1. Подсорин, В. А. Оценка стоимости жизненного цикла подвижного состава [Текст] : учеб.-метод. пособие по решению индивидуального задания по дисциплине «Экономические методы управления жизненным циклом производственных и социальных систем» / В. А. Подсорин, А. В. Харитоновна. – М. : МГУПС (МИИТ), 2016. – 34 с.
2. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным [Текст]. – Введ. 1.01.1991 г. – М., 1991. – 133 с.

3. Рубан, А. И. Методы анализа данных [Текст] : учеб. пособие / А. И. Рубан. – 2-е изд., исправл. и доп. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. – 319 с.
4. Третьяков, А. В. Управление индивидуальным ресурсом вагонов в эксплуатации [Текст] : монография / А. В. Третьяков. – СПб. : Ом-Пресс, 2004. – 348 с.
5. Морчиладзе, И. Г. Модификация конструкции и технического обслуживания вагона-цистерны в условиях транспортной компании [Текст] / И. Г. Морчиладзе. – СПб. : «ОМ-Пресс», 2003. – 158 с.
6. Мурадян, Л. А. К вопросу о планах испытаний надежности механических систем [Текст] / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 157. – С.119-127.
7. Мурадян, Л. А. Построение моделей отказов грузовых вагонов на основе байесовского подхода [Текст] / Л. А. Мурадян // EUREKA: Physics and Engineering. – 2016. – С. 54–60.
8. Беляев, Ю. К. Статистические методы обработки результатов испытаний на надежность [Текст] / Ю. К. Беляев. – М. : Знание, 1982. – 384 с.
9. Богдановф, Дж. Вероятностные методы модели накопления повреждений [Текст] / Дж. Богдановф, Ф. Козин. – М. : Мир, 1989. – 344 с.
10. Мямлін, С. В. Застосування основних законів розподілу випадкових величин для визначення показників надійності вагонів [Текст] / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян // Зб. наук. праць ДЕТУТ. Сер. Транспортні системи і технології. – 2015. – Вип. 26–27. – С. 172-180.
11. Довідник основних показників роботи залізниць України (2004-2014 роки) [Текст] / Мін-во інфраструктури України; Укрзалізниця; Н. В. Котіль. – К., 2015. – 59 с.
12. Коллакот, Р. Диагностика повреждений [Текст] : пер. с англ. / Р. Коллакот. – М. : Мир, 1989. – 512 с.
13. Nebojsa Bojovic, Branislav Boskovic, Milos Milenkovic & Aleksandar Sunjic (2010) A two-level approach to the problem of rail freight car fleet composition [Text] // Transport, 25:2, 186-192, DOI: 10.3846/transport.2010.23.
14. Myamlin, S. Mathematical Modeling of Dynamic Loading of Cassette Bearings for Freight Cars [Text] / S. Myamlin, O. Lunys, L. Neduzha, O. Kyryl'chuk // Proc. of 21st Intern. Scientific Conf. «Transport Means. 2017». – Kaunas, 2017. – P. 973-976.
15. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних) [Текст]. – Чинний з 01.07.2015. – К., 2010. – 162 с.
16. Нормы для расчета и проектирования вагонов, железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М. : ГосНИИВ, ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
17. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения [Текст] / О. М. Савчук, В. К. Бруякин, Л. А. Мурадян [и др.] // Вагонный парк. – 2009. – № 5/6. – С. 30–32.

---

Мямлін Сергій Віталійович, д-р техн. наук, професор, перший заступник директора філії «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту ПАТ «Укрзалізниця»».

Тел.: +38(044) 528 93 01. E-mail: sergeymyamlin@gmail.com ORCID 0000-0002-7383-9304.

Скалозуб Владислав Васильович, д-р техн. наук, професор, декан факультету «Технічна кібернетика», кафедра комп'ютерних інформаційних технологій Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Тел.: +38(056) 373 15 52. E-mail: scalozub.vl.v@gmail.com ORCID: 0000-0002-1941-4751.

Мурадян Леонтій Абрамович, канд. техн. наук, доцент кафедри вагонів та вагонного господарства Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Тел.: +38 (056) 373 15 19. E-mail: leontymuradian@gmail.com. ORCID: 0000-0003-1781-4580.

---

Мямлин Сергей Витальевич, д-р техн. наук, профессор, первый заместитель директора филиала «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт железнодорожного транспорта» ПАО «Укрзалізниця». Тел. +38 (044) 528 93 01. E-mail: sergeymyamlin@gmail.com ORCID 0000-0002-7383-9304.

Скалозуб Владислав Васильевич, д-р техн. наук, профессор, декан факультета «Техническая кибернетика», кафедра компьютерных информационных технологий Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Тел. +38(056) 373 15 52.  
E-mail: scalozub.vl.v@gmail.com ORCID: 0000-0002-1941-4751.

Мурадян Леонтий Абрамович, канд. техн. наук, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Тел.: +38 (056) 373 15 19. E-mail: leontymuradian@gmail.com. ORCID 0000-0003-1781-4580.

Miamlyn Sergiy, D. Sc. (Tech.), professor, Branch "Sey" of jsc "Ukrzaliznytsia" Branch "Rail transport scientific and engineering institute" of public joint stock company "Ukrainian Railway". E-mail: sergeymyamlin@gmail.com ORCID 0000-0002-7383-9304.

Skalozub Vladislav, D. Sc. (Tech.), professor, Dean of the Faculty Technical Cybernetics. Department of Computer Information Technologies of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. Тел.: +38(056) 373 15 52. E-mail: scalozub.vl.v@gmail.com ORCID: 0000-0002-1941-4751.

Muradian L., PhD (Tech.), associate professor, Department of Car and Car Facilities, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. Tel.:+38 (056) 373 15 19.  
E-mail: leontymuradian@gmail.com ORCID: 0000-0003-1781-4580.

Статтю прийнято 02.01.2019 р.

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

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

*Випуск 182*

«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.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 26.12.2018 р.  
Формат паперу А4. Папір писальний.  
Умовн.друк. арк. 7,5. Тираж 105. Замовлення № .

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