



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 190

Харків 2020

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.

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 № 4 від 04 червня 2020 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 15.10.2019 р. № 1301).

Редакційна колегія

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

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

Залізничний транспорт (273)

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

Будівництво та цивільна інженерія (192)

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

Механічна інженерія (131, 132, 133)

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

Транспортні технології (275)

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

Геодезія та землеустрій (193)

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

Теплоенергетика (144)

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

ЗМІСТ

Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Субботіна В. В.* Фазовий склад і властивості МДО-покриттів на силуміні АК7 (АЛ9) 6

Теплоенергетика (144)

- Круковський П. Г., Дейнеко А. І., Дядюшко Є. В.* Аналіз ефективності методів осушення тунельного повітря метрополітену при розташуванні обладнання в обвідних ходках 13

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Гончаренко Д. Ф., Старкова О. В., Алейнікова А. І., Дегтяр Є. Г.* Теоретичне обґрунтування вибору способу відновлення каналізаційних колекторів 27
- Ромашко-Майструк О. В.* Моделювання зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах 35

Геодезія та землеустрій (193)

- Качановський О. І.* Економічні передумови відшкодування збитків, спричинених непроведеним рекультивації земель 42

Залізничний транспорт (273)

- Мартинів І. Е., Труфанова А. В., Бабенко А. О., Шовкун В. О.* До питання забезпечення безпеки руху у пасажирському господарстві 50

УДК 669.295.539.121

ФАЗОВИЙ СКЛАД І ВЛАСТИВОСТІ МДО-ПОКРИТТІВ НА СИЛУМІНІ АК7 (AL9)

Канд. техн. наук В. В. Субботіна

PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES OF MDO-COATINGS ON SILUMIN AK7 (AL9)

PhD (Tech.) V. V. Subbotina

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.213910>

Анотація. Наведено результати дослідження структури і властивостей покриттів на сплаві АК7 (AL9), сформованих мікродуговим окисдуванням в лужно-силікатному електроліті (KOH + Na₂SiO₃ (рідке скло)). Процес формування покриттів проводили в циліндричній ванні ємністю 20 л, виготовленій з нержавіючої сталі. Встановлено, що процес мікродугового окисдування на сплаві АК7 здійснюється при початковій кислотності рН у інтервалі 10,0–13,0 і електроопорі $\rho = 100\text{--}350 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Встановлено, що структурною особливістю МДО-покриттів на сплаві АК7 є їх двошарова будова (технологічного та робочого шарів). Мікроскопічні дослідження показали, що покриття зростає вглиб і назовні оброблюваної деталі. Однак прирощення розміру деталі зв'язано, в основному, з технологічним шаром.

Аналіз отриманих результатів вказує на те, що склад електроліту впливає на товщину технологічного шару, яка збільшується з підвищенням вмісту силікату натрію (Na₂SiO₃) в розчині. Товщина ж основного робочого шару в різних електролітах практично однакова.

МДО-покриття мають кристалічну будову й основними фазами є оксид алюмінію $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ і муліт $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$. Найбільша твердість покриттів, які були отримані протягом 3 год в електроліті складу 1 г/л KOH + 6 г/л Na₂SiO₃. Твердість таких покриттів досягає 14,7 ГПа.

Встановлено, що в інтервалі навантажень 0–2 кН коефіцієнт тертя поверхні без покриття збільшується від 0 до 0,03. Після нанесення МДО-покриття коефіцієнт тертя у всьому інтервалі навантажень не перевищує 0,007.

Проведене дослідження показало, що незважаючи на те, що кремній, який входить до складу сплаву АК7 (AL9), утруднює процес формування бар'єрного шару на оброблюваній поверхні, завдяки вибору режимів МДО-процесу вдається провести поверхневе зміцнювання сплавів внаслідок формування оксидних покриттів (HV ~ 15000 МПа). Отримані результати вказують на можливість розширення кола алюмінієвих сплавів, зміцнюваних методом МДО.

Ключові слова: силуміни, МДО-покриття, фазовий склад, мікротвердість, коефіцієнт тертя.

Abstract. The results of studying the structure and properties of coatings on the AK7 (AL9) alloy formed by microarc oxidation in an alkaline silicate electrolyte (KOH + Na₂SiO₃ (water glass)) are presented. The process of coating formation was carried out in a cylindrical bath with a capacity

of 20 liters, made of stainless steel. It has been established that the process of microarc oxidation on AK7 alloy is carried out at an initial pH of 10.0–13.0 and an electrical resistance of $\rho = 100\text{--}350 \Omega \cdot \text{cm}$.

It is established that the structural feature of MAO coatings on AK7 alloy is their two-layer structure (technological and working layers). Microscopic studies have shown that the coating grows in and out of the workpiece. However, the increment in the size of the part is associated mainly with the technological layer.

An analysis of the results indicates that the electrolyte composition affects the thickness of the technological layer, which increases with increasing content of sodium silicate (Na_2SiO_3) in solution. The thickness of the main working layer in various electrolytes is almost the same.

MAO coatings have a crystalline structure and the main phases are $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ alumina and $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ mullite. The highest hardness of the coatings that were obtained in an electrolyte with a composition of 1 g/l KOH + 6 g/l Na_2SiO_3 for 3 hours. The hardness of such coatings reaches 14.7 GPa.

It was found that in the load interval 0-2 kN, the coefficient of friction of the surface without coating increases from 0 to 0.03. After applying the MAO coating, the friction coefficient in the entire load range does NOT exceed 0.007.

The study showed that despite the fact that silicon, which is part of the AK7 (AL9) alloy, complicates the process of forming a barrier layer on the treated surface, due to the choice of the MAO process modes, it is possible to conduct surface hardening of the alloys due to the formation of oxide coatings ($\text{HV} \sim 15000 \text{ MPa}$). The results obtained indicate the possibility of expanding the circle of aluminum alloys hardened by the MAO method.

Keywords: silumins, MAO-coating, phase composition, microhardness, coefficient of friction.

Вступ. Нанесення покриттів на поверхню матеріалів, а також регулювання їх складу і структури дозволяє найбільш раціонально і рентабельно використовувати властивості матеріалів основи і модифікованих шарів. Методи модифікування поверхні ділять на дві групи: модифікування з приростом товщини і без цього. Такий підхід дозволяє найбільш ефективно використовувати комбінацію властивостей матеріалу основи і зміненого поверхневого шару. При цьому операції модифікування поверхні можуть бути досить легко вбудовані в технологічний процес виробництва або ремонту виробів [1].

Науковою основою для оптимізації режимів модифікації поверхні є метод структурної інженерії поверхні [2]. Для одержання високоефективних захисних покриттів на вентильних матеріалах (Al, Ti, Mg) останнім часом впроваджується в промисловість метод анодно-іскрового електролізу [3] (який часто називають мікродуговим окисдуванням (МДО) [4]).

Забезпечуючи високу адгезію покриття з оброблюваною поверхнею, метод МДО стає ефективним способом зміцнювання поверхні деталей з алюмінієвих сплавів та інших сплавів вентильної групи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Алюмінієві сплави широко застосовуються в різних галузях промисловості. Їх широко використовують для виготовлення різних деталей і елементів конструкцій, коли провідну роль має мала вага, висока пластичність, корозійна стійкість, добра зварюваність.

Найбільш широке застосування в енергомашинобудуванні одержали алюмокремнієві сплави (силуміни). Деталі із силумінів, що працюють в умовах тертя й кавітації, вимагають поверхневого зміцнювання. Через це необхідний пошук нових технологій зміцнення поверхні, які дозволять надати виробам з цих сплавів зносостійкості, дадуть можливість використання їх у парах тертя, відіграють роль дифузійного бар'єра, дозволять

гальмувати доступ агресивних середовищ, забезпечуючи захист від корозії [5].

Варіюючи склад електроліту і змінюючи електричні режими обробки, можна отримувати керамікоподібні покриття з унікальними функціональними властивостями. Однак через відсутність цілеспрямованих порівняльних досліджень з кінетики зростання на поверхні різних алюмінієвих сплавів виникає проблема тривалого емпіричного підбору оптимальних режимів мікродугового оксидування [6, 7]. Це у великій мірі відноситься до МДО-обробляння силумінів, так як для цього матеріалу існують технологічні складності одержання якісних покриттів у зв'язку зі структурною неоднорідністю основи [8].

Мета та завдання дослідження. Мета – показати можливість і доцільність застосування МДО до алюмінієвого сплаву АК7 (АЛ9) на основі даних структурної інженерії.

Виходячи з накопиченого досвіду застосування МДО до алюмінієвих сплавів, що деформуються [8], при оброблянні сплаву АЛ7 використовувалися лужно-силікатні електроліти, які в більшості

випадків забезпечують формування якісних покриттів.

Виконання поставленої мети передбачало обробляння серії зразків в електролітах різного складу; визначення фазового складу покриттів; мікротвердості; оцінку антикавітаційних властивостей; визначення коефіцієнта тертя.

Основна частина дослідження. Процес формування покриттів проводили в циліндричній ванні ємністю 20 л, виготовленій з нержавіючої сталі. Є сорочка водяного охолодження і повітряний барботаж електроліту. Застосовувалося джерело живлення конденсаторного типу потужністю 10 кВт.

Експериментально встановлено, що процес мікродугового оксидування на сплаві АК7 здійснюється в лужно-силікатному електроліті (KOH + Na_2SiO_3 (рідке скло)) при початковій кислотності рН у інтервалі 10,0–13,0 і електроопорі $\rho = 100\text{--}350$ Ом•см. Однак для одержання якісного оксидного покриття на цьому сплаві необхідне остаточне коректування рН.

Електроліти та режими мікродугового оксидування, застосовувані для оптимізації технології нанесення покриттів на сплаві АК7, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри МДО-процесу

№ п\п	Склад електроліту, г/л		Щільність струму A/dm^2	Тривалість процесу, год	рН	ρ , Ом•см
	KOH	Рідке скло				
1	1	6	13–20	1–3	11,60	254
2	2	6	13–20	1–3	12,14	130
3	2	12	13–20	1–3	11,90	150

На рис. 1 подано графік, що показує кінетику зміни товщини оксиду в процесі оксидування в різних електролітах. Товщина оксидного покриття визначалася на вихровому товщиномірі ВТ-10НЦ. Спостерігається вплив складу електроліту на швидкість формування оксидних покриттів. Так, при оксидуванні в електро-

літі № 1 швидкість зростання покриття мінімальна, а в електроліті № 3 – максимальна.

Структурною особливістю покриттів є їх двошарова будова (технологічний поверхневий шар і робочий шар, який утворюється на матеріалі-основі), яка чітко виявляється на поперечних шліфах (рис. 2).

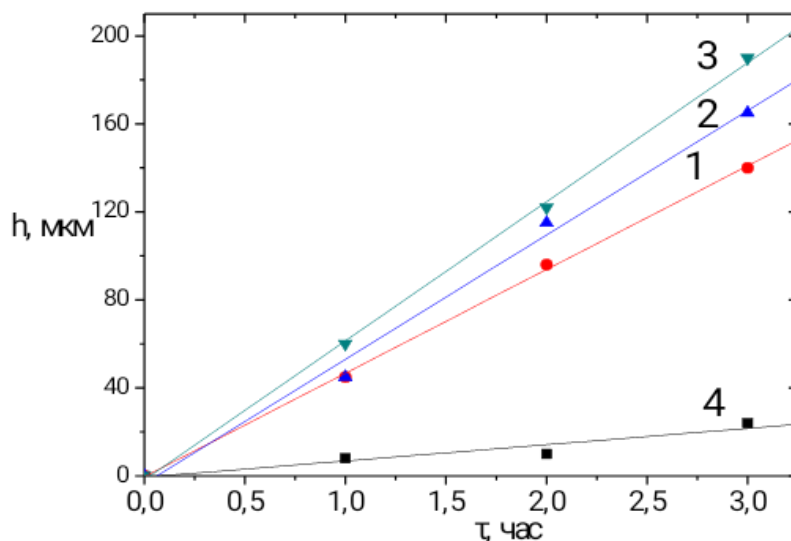


Рис. 1. Кінетика формування товщини покриття ($j = 20 \text{ А/дм}^2$):
 електроліти: 1 – 1 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3 ; 2 – 2 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3 ;
 3 – 2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3 ; 4 – зміна розміру деталі після видалення технологічного шару



Рис. 2. Покриття на сплаві АК7 (x 200):
 електроліти: а – 2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3 , $\tau = 3$ год;
 б – 1 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3 , $\tau = 2$ год

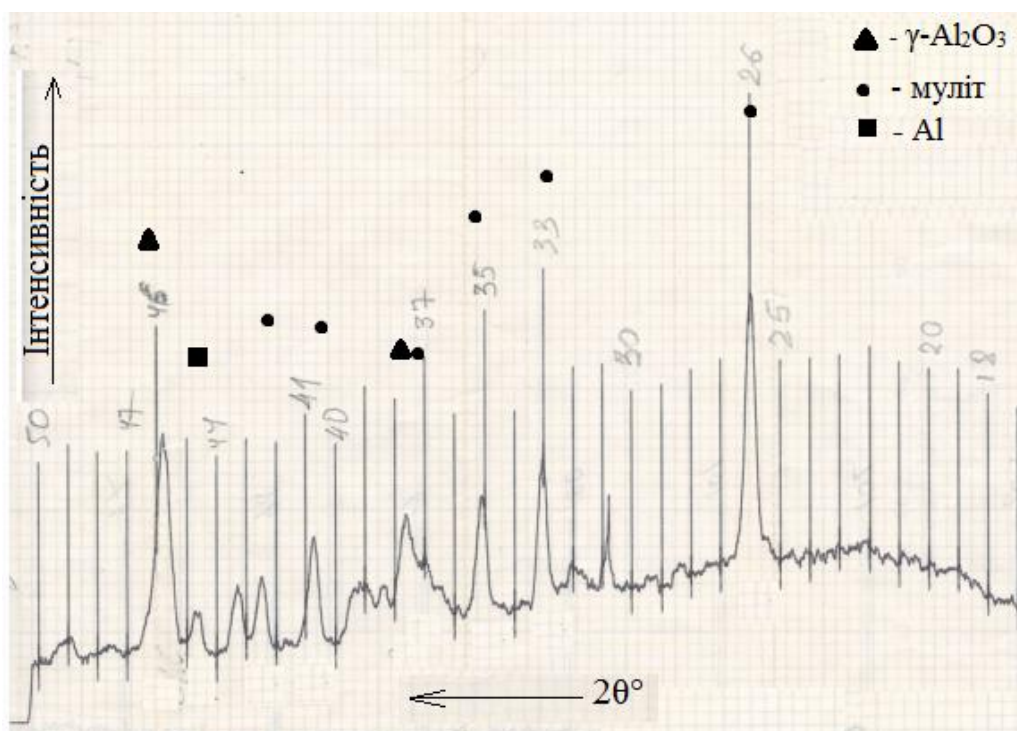
Технологічний поверхневий шар – пористий, незносостійкий, легко видаляється шляхом зачищення на абразивному папері. Частка технологічного шару складає 30–40 % від загальної товщини покриття. Результати, наведені нижче, будуть відноситися до основного шару, товщина якого близько 100 мкм.

Рентгенівський фазовий аналіз (апарат ДРОН-3, випромінювання $K_{\alpha}\text{-Cu}$) показав, що покриття має кристалічну будову й основними фазами є оксид алюмінію $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ і муліт $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (рис. 3).

Результати дослідження зміцнених шарів на сплаві АК7 наведено в табл.2.

Характеристики оксидного покриття на сплаві АК7 ($j = 20 \text{ А/дм}^2$)

Параметри МДО		Товщина покриття, мкм		Зміна розміру зразка, мкм		Мікротвердість, МПа	Фазовий склад		
Електроліт	Час оброблення τ , год	Загальна	Основний шар	Після МДО	Після зняття пухкого шару		α - Al_2O_3	γ - Al_2O_3	Муліт
1 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3	1	67	30	45	6	12500	0	66	34
	2	90	60	40	10	14200	13	46	41
	3	140	98	65	25	14700	14	34	52
2 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3	1	45	22	22	0	12000	5	92	3
	2	120	60	75	15	12500	13	47	40
	3	161	109	83	22	13000	15	40	45
2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3	1	52	28	25	0	11000	2	96	2
	2	127	67	69	8	11000	8	39	53
	3	184	113	100	23	12500	12	25	63

Рис. 3. Ділянка дифракційного спектра покриття на сплаві АК7 (електроліт – 2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3)▲ – γ - Al_2O_3 ; ● – муліт; ■ – Al

Аналіз отриманих результатів (табл. 2) вказує на те, що склад електроліту впливає на товщину технологічного шару, яка збільшується з підвищенням вмісту силікату

натрію в розчині. Товщина ж основного робочого шару в різних електролітах практично однакова.

Встановлено, що покриття зростає вглиб і назовні оброблюваної деталі. Однак прирощення розміру деталі пов'язане, в основному, з технологічним шаром. Після видалення неробочого технологічного шару зміна розміру деталі залежить від часу оксидування й становить 5–25 мкм. Так, наприклад, при загальній товщині основного шару 100 мкм зміна розміру зразка становить 25 мкм. Слід зазначити, що основними фазами в покриттях на сплаві АК7 є $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ і муліт $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, що обумовлює твердість покриття не вище 15000 МПа. Що ж стосується фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, яка має максимальну твердість, то вміст її не перевищує 15%. Очевидно, збільшення вмісту α -фази в структурі покриття повинно суттєво позначитися на твердості покриття і його зносостійкості. Однак підвищений вміст S, як в основі, так і в електроліті, сприяє утворюванню муліту, а не корунду [9].

У роботі також були досліджені антифрикційні властивості покриттів на сплаві АК7 у парі з дизельним чавуном (рис. 4).

Випробування проводилися на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск-колодка».

Як видно з отриманих результатів (рис. 4), при відсутності МДО-покриття на сплаві (крива 1) зі збільшенням навантаження відбувається безперервне збільшення коефіцієнта тертя. Це пов'язано з налипанням пластичного матеріалу сплаву на основі алюмінію. При збільшенні навантаження таке налипання посилюється, що призводить до збільшення коефіцієнта тертя. Наявність на поверхні МДО-покриття (з найбільшою твердістю 14,7 ГПа, табл. 2) призводить до зміни виду кривої залежності коефіцієнта тертя від навантаження. При відносно невеликому навантаженні (до 0,5 кН) відбувається притирання пари тертя і коефіцієнт тертя збільшується до 0,0075. Однак при великих навантаженнях тверда керамічна поверхня МДО-покриття дозволяє не тільки не збільшити коефіцієнт тертя, але і трохи його зменшити (до 0,007). Причиною останнього, очевидно, є особливості будови розгалуженої поверхні МДО-покриттів [9].

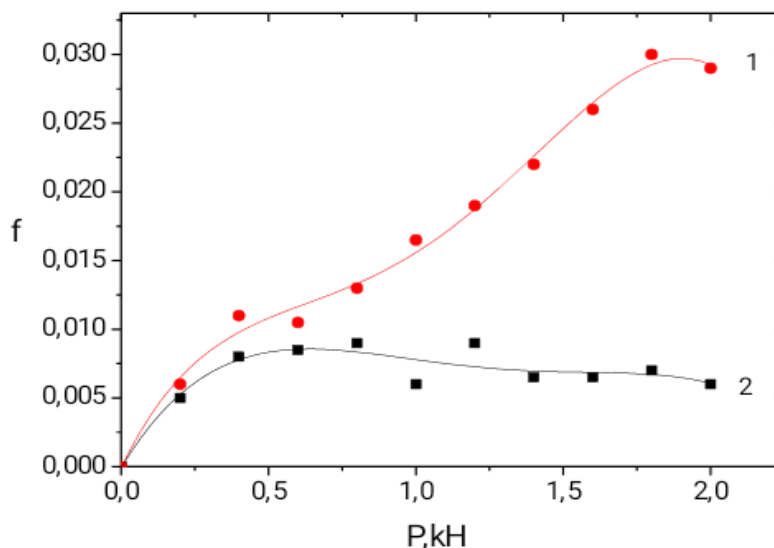


Рис. 4. Залежність коефіцієнта тертя від навантаження
1 – чавун – сплав АК7; 2 – чавун – сплав АК7 з МДО-покриттям

Таким чином, наявність МДО-покриття суттєво знижує коефіцієнт тертя.

Проведене дослідження дозволяє рекомендувати такі параметри мікродугового

оксидування алюмінієвого сплаву АК7: оксидування проводити у водяному розчині, що містить 1 г/л КОН і 6 г/л рідкого скла (Na_2SiO_3); робоча температура електроліту

підтримується в інтервалі 15–30 °С; початкова щільність струму становить 16–20 А/дм²; другим електродом служить нержавіюча сталь; у процесі оксидування здійснюється безперервне перемішування електроліту повітрям; тривалість процесу 2–3 години. Товщина основного шару одержуваного покриття становить 80–100 мкм.

Висновки. Проведене дослідження показало можливість поверхневого зміцнення кременистих алюмінієвих ливарних

сплавів шляхом формування оксидних покриттів (HV ~ 15000 МПа). Відзначимо, що накопичений досвід з оксидування алюмінієвих сплавів не дозволив апріорі стверджувати про можливість оксидування методом МДО сплаву АК7, оскільки велика кількість Si утруднює процес формування бар'єрного шару на оброблюваній поверхні. Таким чином, отримані результати вказують на можливість розширення кола алюмінієвих сплавів, зміцнюваних методом МДО.

Список використаних джерел

1. Belozero V., Mahatlova A., Sobol' O., Subbotina V., Subbotin A. Investigation of the influence of technological conditions of microarc oxidation of magnesium alloys on their structural state and mechanical properties. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol 2 (5–86). P. 39–43.
2. Sobol O. V., Andreev A. A., Gorban V. F., Meylekhov A. A., Postelnyk H. O., Stolbovoy V. A. Structural engineering of the vacuum Arc ZrN/CrN multilayer coatings. *Journal of nano- and electronic physics*. 2016. Vol. 8(1). P. 1042-1–1042-5.
3. Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Doney S.J. Plasma electrolysis for surface engineering. *Surf. Coat. Technol.* 1999. Vol. 122. P. 73–93.
4. Yang, Y., Gu, Y., Zhang, L., Jiao, X., Che, J. Influence of MAO Treatment on the Galvanic Corrosion Between Aluminum Alloy and 316L Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017. Vol. 26 (12). P. 6–9.
5. Curran J. A., Clyne T. W. Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium. *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 199. P. 176099–176106.
6. Martin J., Melhem A., Shchedrina I., Duchanoy T., Nominé A., Henrion G., Czerwicz T., Belmonte T. Effects of electrical parameters on plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Surf. Coat. Technol.* 2013. Vol. 221. P. 70–76.
7. Chen C.-M., Chu H.-J., He J.-L. Anodic dyeing of micro-arc oxidized aluminum with a cathodic pretreatment. *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 324. P. 92–98.
8. Суминов И. В., Эпельфельд А. В., Людин В. Б., Крит Б. Л., Борисов А. М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). Москва: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
9. Subbotina V. V., Al-Qawabeha, U.F., Sobol', O.V., Belozero V.V., Schneider V.V., Tabaza T.A., Al-Qawabah S.M. Increase of the α -Al₂O₃ phase content in MAO-coating by optimizing the composition of oxidated aluminum alloy. *Functional Materials*. 2019. Vol. 26(4). P. 752–758.

Субботіна Валерія Валеріївна, канд. техн. наук, доцент кафедри матеріалознавства Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тел. (057) 707-64-35. E-mail: subbotina.valeri@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-3882-0368.

Subbotina Valeria Valerievna PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Materials Science, National technical university «Kharkov polytechnic institute». Tel. (057) 707-64-35. E-mail: subbotina.valeri@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-3882-0368.

Статтю прийнято 20.02.2020 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 697.92: 697.95

**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ОСУШЕННЯ ТУНЕЛЬНОГО ПОВІТРЯ
МЕТРОПОЛІТЕНУ ПРИ РОЗТАШУВАННІ ОБЛАДНАННЯ В ОБВІДНИХ ХОДКАХ**

Д-р техн. наук П. Г. Круковський, старш. наук. співроб. А. І. Дейнеко,
мол. наук. співроб. Є. В. Дядюшко

**ANALYSIS OF EFFICIENCY OF METHODS DRYING OF THE METRO POLYETH AIR
WITH THE EQUIPMENT IN THE BYPASS WAY**

D. Sc. (Tech.) P. G. Krukowsky, Senior Research A. I. Deineko,
Junior Researcher Ye. V. Diadushko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.213923>

***Анотація.** Дана стаття є продовженням трьох попередніх статей [1-3], присвячених вибору та обґрунтуванню методу зниження вологості тунельного повітря службових з'єднувальних гілок (СЗГ) глибокого залягання КП «Київський метрополітен» з довжиною 1400 м шляхом вибору оптимального режиму роботи вентиляційних установок на нагнітання з навколишнього середовища в тунелі в теплу пору року більш сухого повітря, ніж від станцій. В 2018 р. цей метод дав позитивний результат, однак в 2019 р., коли стінки тунелю були взимку переохолоджені, такого підходу стало недостатньо, тому постало завдання пошуку інших шляхів зниження вологості за допомогою розташування додаткового обладнання в обвідному ходку, який знаходиться приблизно на 1/3 найдовшої гілки СЗГ. В статті за допомогою моделювання тепловологого стану всієї СЗГ розглядаються три наступних способи: прискорення основного потоку за допомогою додаткового вентилятора, спеціального осушувального обладнання та додаткового вентилятора з підігрівом повітря. Показано, що останній спосіб є найбільш ефективний і економічно вигідний для додаткового осушення тунельного повітря.*

***Ключові слова:** метрополітен, підземний тунель глибокого залягання, обвідний ходок, вологість повітря, асиміляція, нагрівання, осушування.*

***Abstract.** Ensuring the normalized parameters of the microclimate of tunnel air of service connecting branches (SCB) of the deep underground utility company "Kiev Metro" with a length of 1400 m is a priority, through avoiding damage to the insulating materials of the contact flights, which can cause a short circuit. The location of ventilation equipment or drainage or heating installations in a single-track tunnel of the connecting branch is impossible due to limited space, therefore the only place where such equipment can be located is a bypass tunnel.*

With the optimized operation of the mechanical tunnel ventilation system in energy-saving modes, in 2019, for technical reasons, the soil layer around the tunnels was cooled, resulting in a decrease in the temperature of the tunnel air and an increase in relative humidity above the normal level, which sometimes reached 95 %.

The value of the relative humidity of the tunnel air in underground tunnels of deep underground utility company "Kiev Metro" depends on the temperature and absolute humidity of the tunnel air, the temperature of the rim of the walls of the tunnels and the presence of possible additional sources of moisture in the tunnels.

The decrease in the relative humidity of the tunnel air during the implementation of the assimilation method by increasing the air exchange SCB-1 in the line to the station. m. Khreschatyk with a length of 1400 m due to the installation of an additional ventilation unit in the bypass tunnel (in the area of PK09 + 40) and means of directing the air flow into the tunnel can lead to an increase in the flow rate of tunnel air to 30 and 26 kg/s, respectively, while the relative humidity will decrease by 5 %. To implement this method, it is necessary to expend an electric power of 40 kW.

When implementing the method of drying tunnel air with an additional air drying machine located in the bypass tunnel, it is possible to reduce the relative humidity by (12...14) % and to ensure compliance with the standard humidity of 75 %. However, the implementation of this method is energy-intensive in comparison with the implementation of the assimilation method (increase in air exchange), since the necessary expenditure of electric power for drainage is about 212 kW.

According to the results of the study for utility company "Kiev Metro", a method of heating tunnel air with an additional heat gun installed in the bypass tunnel with a 40 kW heater based on electric heating elements is recommended, which will lead to heating of the tunnel air with a simultaneous decrease in relative humidity by (7...11) % warming the soil layer around the tunnel and avoiding its cooling in the future. The practical implementation of the method for heating tunnel air requires an electric power cost of about 60 kW.

Keywords: *underground, underground tunnel of deep occurrence, bypass tunnel, air humidity, assimilation, heating, drainage.*

Вступ. Поетапне будівництво київського метрополітену розпочалося з 1949 року та триває дотепер. З початку будівництва метрополітену було запроектовано та введено в експлуатацію з 1970-х років службові з'єднувальні гілки (СЗГ) між лініями метрополітену, які в даний час використовуються виключно в службових цілях: підвезення будівельних матеріалів та вивезення сміття, планове проходження колієвимірального вагона по всіх лініях, рідше перегін вагонів з однієї робочої гілки на іншу тощо (рис. 1, а). Механічна система тунельної вентиляції СЗГ повинна забезпечувати вологість тунельного повітря не вище нормованого значення 75 % [4]. Проте в проекті вентиляції СЗГ, який розроблено в 1950-х роках, на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» запроектовано вентиляційну шахту, яка не була побудована. Тому через слабкий повітрообмін (необхідна кратність 3, а фактично 2) при надходженні вологи в тунельне повітря від випаровування протікань води через нещільності оправи стінок тунелів, калюж колійних лотоків, при митті тунелів, води при вологому прибиранні станцій, від пасажирів відбувається

перевищення нормованого рівня вологості, що іноді досягає значень близько 95 %.

Внаслідок високої вологості тунельного повітря значно пришвидшуються процеси руйнування оправи стінок тунелів, корозії дорогого обладнання системи електропостачання, розміщеного в СЗГ, погіршення електричних властивостей ізоляційних матеріалів контактної рейки, що у свою чергу призводить до зростання грошових витрат з бюджету метрополітену на ремонти та заміну обладнання. Найбільших збитків через високу вологість тунельного повітря може завдати коротке замикання електрообладнання СЗГ, що у свою чергу може стати причиною зупинки руху потягів на найближчих ділянках робочих колій.

Розміщення вентиляційного обладнання або осушувальних чи нагрівальних установок у одноколійному тунелі з з'єднувальної гілки неможливе через обмежений простір, тому єдиним місцем, де таке обладнання може бути встановлене, є тунель обвідного ходка (рис. 1, б). Крім того, осушування або нагрівання тунельного повітря окремих ділянок тунелю СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» локально

встановленими осушувачами чи нагрівачами не розглядається, оскільки необхідно осушувати тунель по всій

довжині, тому що контактна рейка прокладена по всій довжині тунелю.

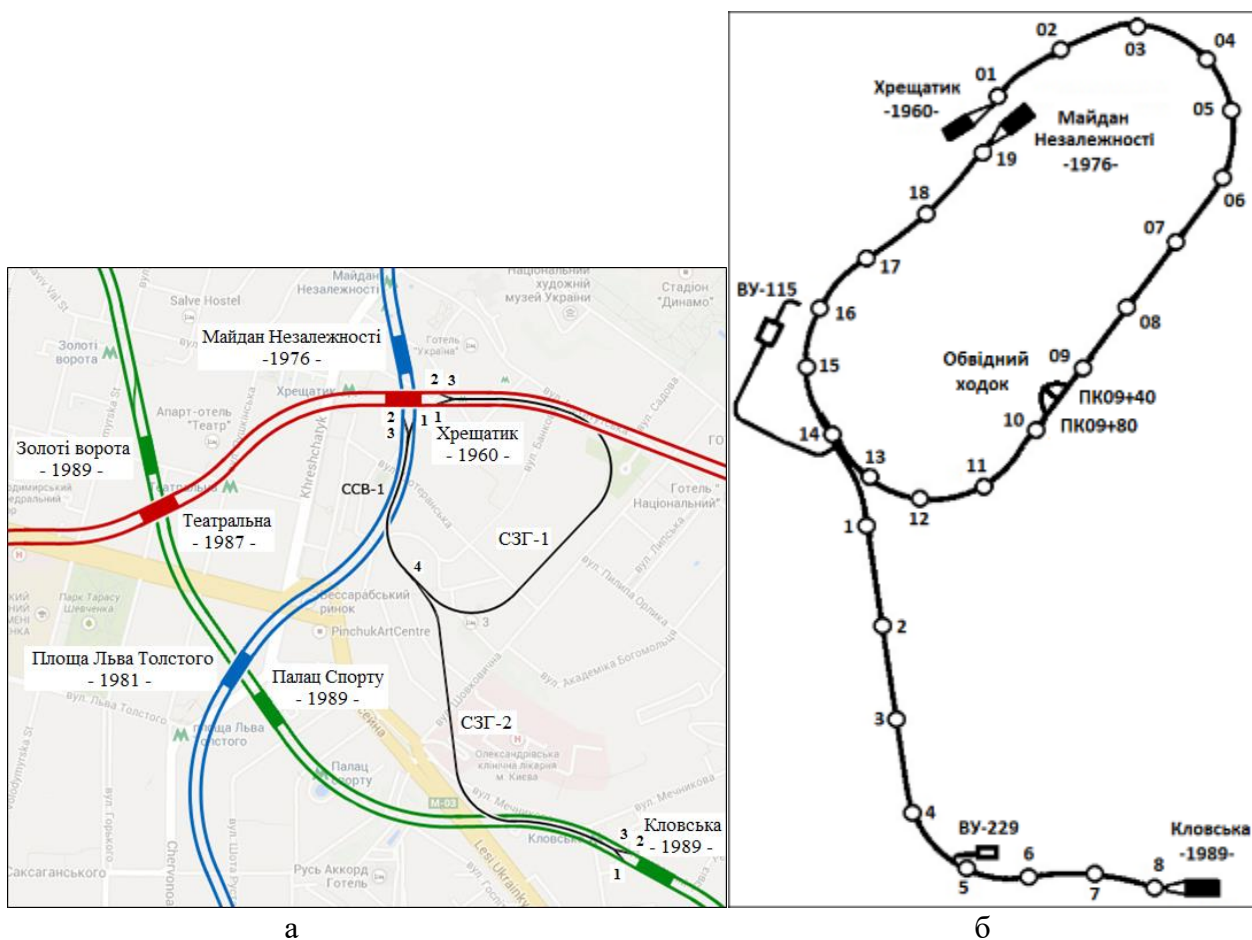


Рис. 1. Схема СЗГ метрополітену: а – схематичне розташування СЗГ між станціями метрополітену: 1-4 – номери стрілок колій; «Хрещатик» - 1960 – назва станції метрополітену та рік побудови відповідно; б – розмітка пікетів СЗГ: 01-19 – номери пікетів СЗГ-1; 1-8 – номери пікетів СЗГ-2

Тому на даний час для КП «Київський метрополітен» гострою проблемою є забезпечення неперевикнення нормованого значення вологості тунельного повітря СЗГ-1 на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З метою зниження відносної вологості в тунелях можна застосовувати такі фізичні методи: провітрювання вологих тунелів повітрям з меншою абсолютною вологістю, збільшення кратності повітрообміну повітрям з меншою

вологістю, видалення частини вологи з повітря методами адсорбції і конденсації, підвищення температури тунельного повітря шляхом нагрівання (при цьому відбуватиметься відповідне зниження відносної вологості повітря).

Метод зниження відносної вологості тунельного повітря шляхом провітрювання вологих тунелів повітрям з меншою абсолютною вологістю в КП «Київський метрополітен» реалізований наступним чином. В період літнього режиму роботи

тунельної вентиляції повітря з навколишнього середовища через вентиляційну шахту ВШ 115 і вентиляційні тунелі (ВТ) вентиляційними установками ВУ115 нагнітається в СЗГ (рис. 1, б), при цьому, протікаючи через ВШ та ВТ, повітряний потік втрачає вологу внаслідок дії відцентрових сил. Таким чином «підсушене» повітря від роз'їзду надходить у ділянки СЗГ, де спочатку відбувається змішування вологого тунельного повітряного потоку з припливним повітрям, що має нижчу абсолютну вологість, внаслідок чого починає зменшуватися відносна вологість. При вентиляції тунелів під кінець літнього періоду спостерігається практично повне висушування оправи стінок тунелів, колійних лотоків та калуж. Зниження відносної вологості тунельного повітря за рахунок вентиляції вологих тунелів КП «Київський метрополітен» повітрям з меншою абсолютною вологістю детально викладено в статтях [1-3]. Головною перевагою методу є дешевизна, оскільки енергія витрачається лише на роботу вентиляційних агрегатів. Недоліками є обмежена здатність поглинання повітрям водяної пари та залежність від температури і абсолютної вологості атмосферного повітря для літнього періоду. Проте, з огляду на дешевизну даного методу, його застосовують для зниження відносної вологості тунелів в метрополітенах [5, 6].

Метод зниження вологості тунельного повітря шляхом його нагрівання в метрополітенах реалізований в принципі реверсивності механічної системи тунельної вентиляції і застосовується лише в літній період [7]. Принцип реверсивності полягає в тому, що в літній період повітря з навколишнього середовища нагнітається на станції метрополітену і видаляється перегінними вентиляційними установками, а в зимовий період навпаки. В результаті чого здійснюється часткове прогрівання оправи стінок тунелів.

Метод адсорбції базується на сорбційних (вологопоглинальних) властивостях

сорбентів, які за рахунок пористо-капілярної структури поглинають водяну пару з повітря. По мірі насичення сорбенту вологою ефективність осушення зменшується, тому сорбент необхідно періодично регенерувати – випаровувати з нього вологу шляхом продування гарячого потоку повітря. У порівнянні з методом нагрівання є більш економічним, оскільки здійснюється нагрівання не всієї кількості вентиляційного повітря, а лише 25-30 % до значно більш високих температур (порядку 150 °С). До недоліків методу відноситься обмежений строк служби сорбенту [8]. Відома робота [9], у якій досліджується можливість використання сорбентів для осушування повітря в метрополітенах.

Метод конденсації оснований на принципі конденсації водяної пари з повітря при охолодженні його нижче точки роси. Метод реалізується з використанням принципу теплового удару, який створюється при роботі холодильного контуру, з розташованими безпосередньо один за одним випарником і конденсатором. При цьому ефективність конденсаційних осушувачів різко спадає із зменшенням відносної вологості повітря [10]. Останнім часом метод видалення вологи з тунельного повітря шляхом конденсації дуже широко застосовується в метрополітенах різних країн світу в поєднанні з енергозберігаючими технологіями [10, 11].

Визначення мети та завдання дослідження. Аналіз шляхів зниження вологості тунельного повітря в підземному тунелі глибокого залягання КП «Київський метрополітен» СЗГ-1 на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» для літнього періоду, обґрунтування і вибір для практичної реалізації шляху з меншою витратою електричної енергії при його експлуатації.

Основна частина досліджень

Геометрична, фізична та математична моделі детально описані в роботі [3]. Розрахунки проведені в програмі Ansys Fluent.

Зниження відносної вологості тунельного повітря за рахунок збільшення кратності вентиляції тунелів повітрям з меншою абсолютною вологістю. Автори раніше в роботах [1-3] розглядали спосіб зниження вологості тунельного повітря для СЗГ-1 і СЗГ-2 шляхом асиміляції тунельного повітря з припливним повітрям (навколишнього середовища), внаслідок чого було розроблено і впроваджено графік роботи механічної системи тунельної вентиляції. Проте, впродовж 2019 року на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» вологість тунельного повітря іноді перевищувала 75 % та досягала значення 95 % з технічних причин в роботі системи вентиляції. Аналіз експериментальних значень параметрів мікроклімату СЗГ (температури повітря і оправи стінок тунелів та абсолютної та відносної вологостей) показав, що внаслідок ремонту вентиляційних агрегатів на перегоні між станціями «Хрещатик» та «Арсенальна» після зимового періоду 2019 року сталося зниження температури тунельного повітря та заохолодження оправи стінок тунелів, в результаті чого відбулося підвищення відносної вологості. Таким чином, при зниженні відносної вологості тунельного повітря способом асиміляції маємо лише один параметр, яким можемо керувати існуючою системою вентиляції – витрата повітря. Оскільки витрата тунельного повітря на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» діючою вентиляцією забезпечується максимально 21 кг/с (кратність повітрообміну 2), тому фахівці КП «Київський метрополітен» запропонували розглянути варіант збільшення витрати тунельного повітря за рахунок додатково встановленого вентиляційного агрегату потужністю 40 кВт в обвідному ходку (рис. 1, б).

На розгляд запропоновано два варіанти. Варіант № 1 – встановлення додаткового вентиляційного агрегату в обвідному ходку (в зоні пікету ПК09+40) та нагнітання і направлення повітряного потоку за допомогою перегородок з

обвідного ходка в тунель під кутом 45° до основного потоку тунельного повітря в напрямку ст. м. «Хрещатик» (рис. 2, а, б).

Варіант № 2 – встановлення додаткового вентиляційного агрегату в обвідному ходку (в зоні пікету ПК09+40) та нагнітання і направлення повітряного потоку за допомогою повітропроводу перерізом $0,48 \text{ м}^2$ ($600 \times 800 \text{ мм}$) і довжиною 1 м вздовж стінки тунелю паралельно основному потоку (рис. 2, б, в) в напрямку ст. м. «Хрещатик».

Таким чином, ідея обох варіантів полягає у використанні ежекційного ефекту – збільшенні витрати і швидкості руху основного тунельного повітря на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» шляхом встановлення в обвідному ходку додаткового вентиляційного агрегату, який в зоні пікету ПК09+80 відбирає частину основного потоку, прискорює його і нагнітає в основний потік в зоні пікету ПК09+40 за допомогою перегородок під кутом до напрямку руху основного потоку або через повітропровід вздовж стінки тунелю паралельно напрямку руху основного потоку до ст. м. «Хрещатик».

В тривимірній газодинамічній моделі ділянки СЗГ-1 враховувалися напірно-витратні характеристики існуючих та додаткового (в обвідному ходку) вентиляційних агрегатів та їх варіанти включення в роботу для літнього періоду. Моделювання проведено при режимі нагнітання зовнішнього повітря в СЗГ для дати 11.07.2019 р., коли витрата повітря становила в середньому 21 кг/с, що обумовлено гідравлічним опором мережі тунелів СЗГ. За результатами моделювання були визначені поля швидкостей та тисків тунельного повітря ділянки СЗГ-1 для обох варіантів (рис. 3). Як видно з рис. 3, а і б, плин потоку повітря, що витікає під кутом з ходка в тунель, має характерну особливість, вона ударяється в протилежну стінку, внаслідок чого в тунелі виникають вихрові зони, які створюють додатковий опір руху тунельному повітря. Якщо змінити кут спрямування повітряного потоку з 45° на

30°, то вихрова зона і опір руху тунельному повітрю зменшаться та відповідно зросте витрата повітря в тунелі (рис. 4). Розташування вентиляційного агрегату в

обвідному ходку так, щоб кут спрямування повітряного потоку в тунель становив 30° або 45°, є технічним завданням для фахівців КП «Київський метрополітен».

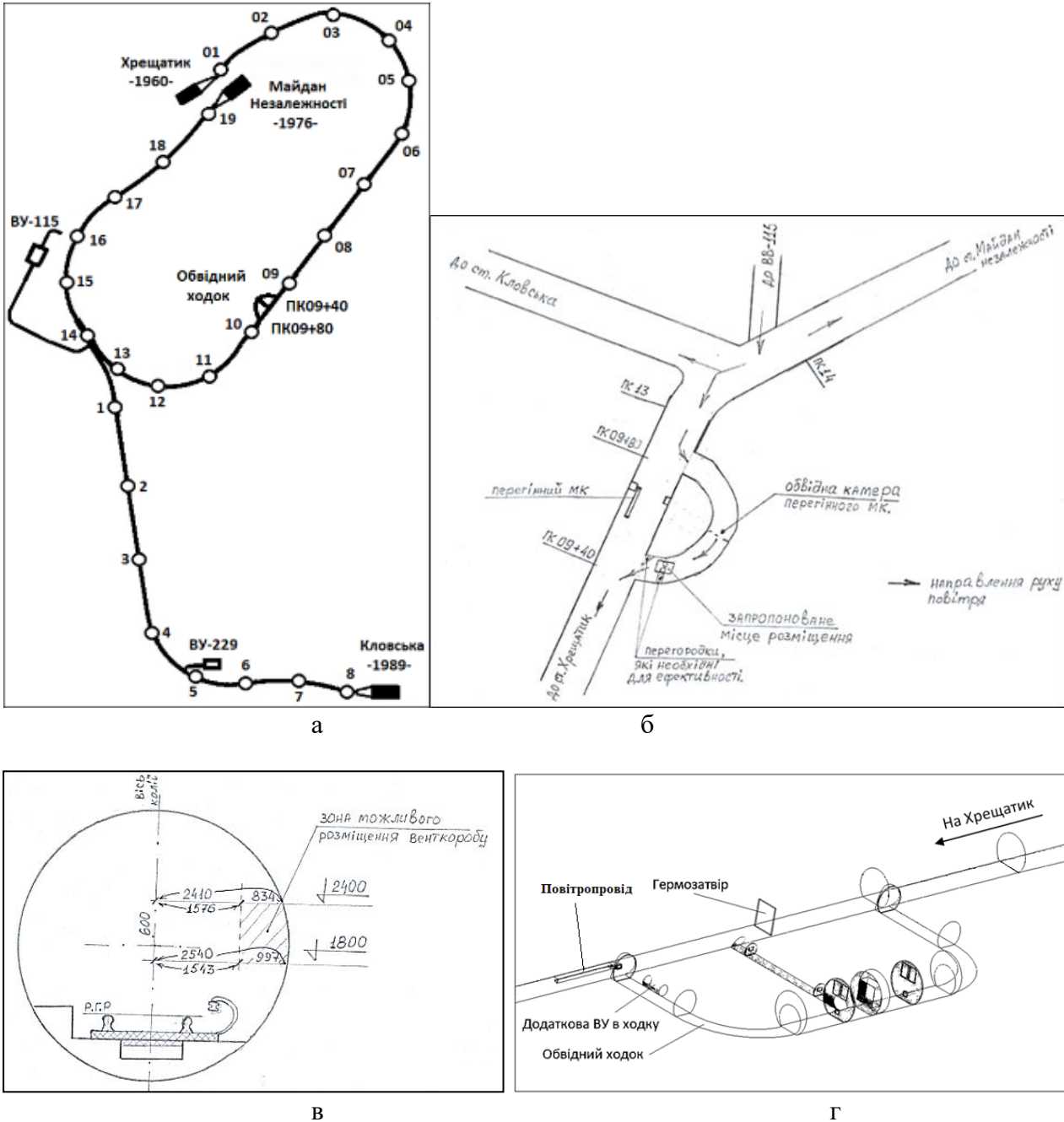
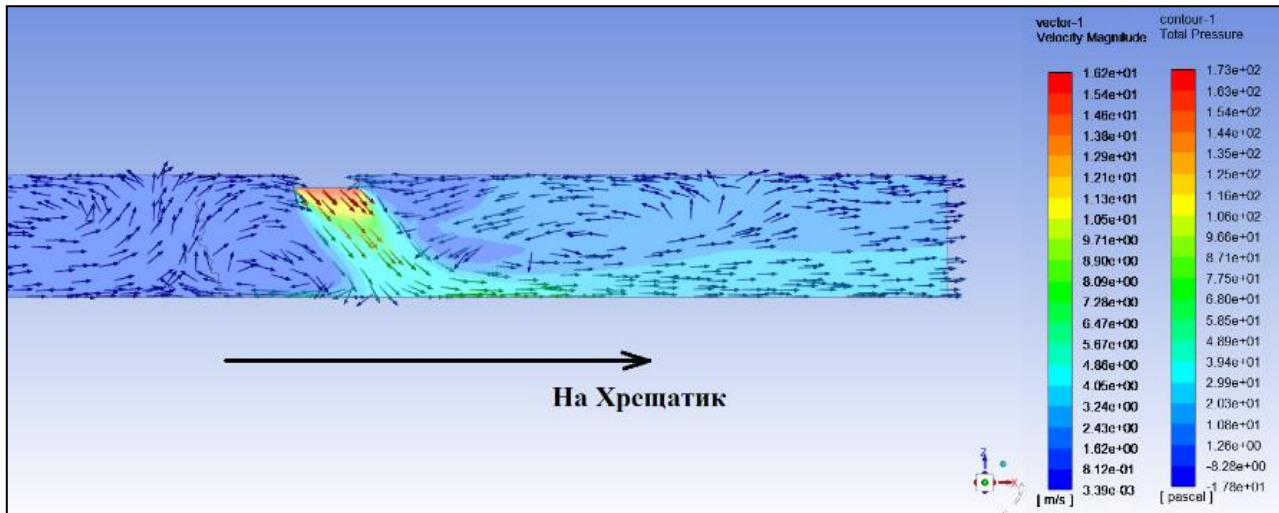
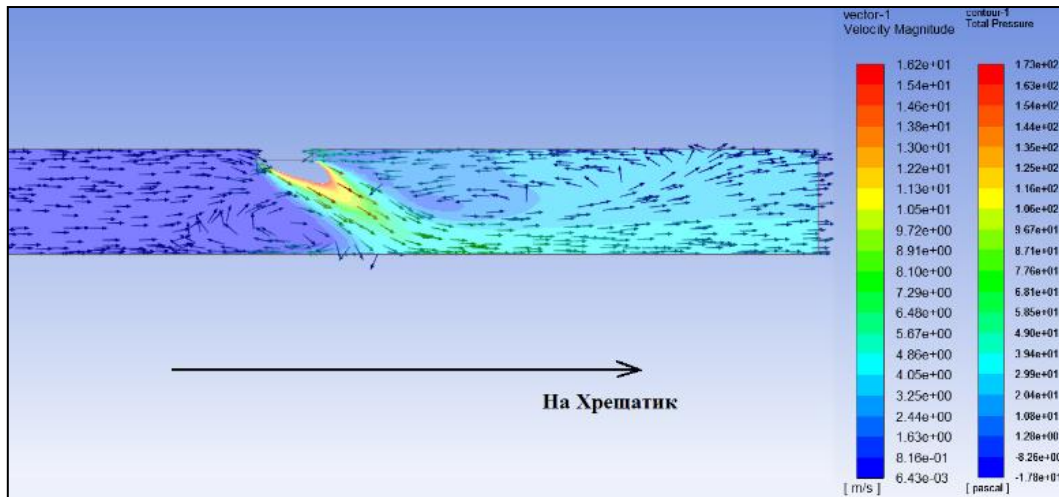


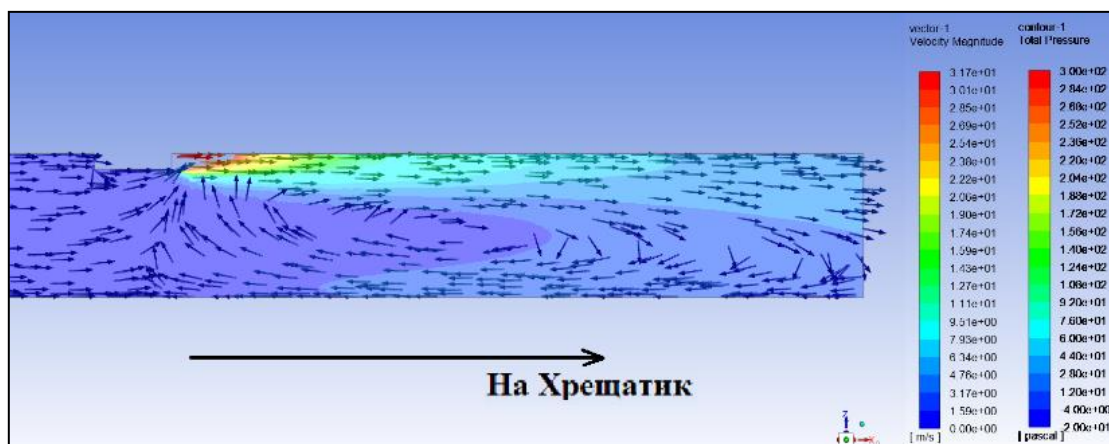
Рис. 2. Загальна схема СЗГ (а), ескіз обвідного ходка № 2 КП «Київський метрополітен» (б), розташування повітропроводу (венткоробу) в поперечному перерізі тунелю (в) (ескіз №1 КП «Київський метрополітен») і тривимірною геометричною моделлю обвідного ходка ПТФ (г)



а



б



в

Рис. 3. Розподіли полів швидкості і тисків у поздовжньому перерізі тунелю для підваріантів напрямків повітряного потоку на виході обвідного ходка під кутом 45 ° (а) і 30 ° (б) до основного потоку та варіанта використання повітропроводу вдовж тунелю (в)

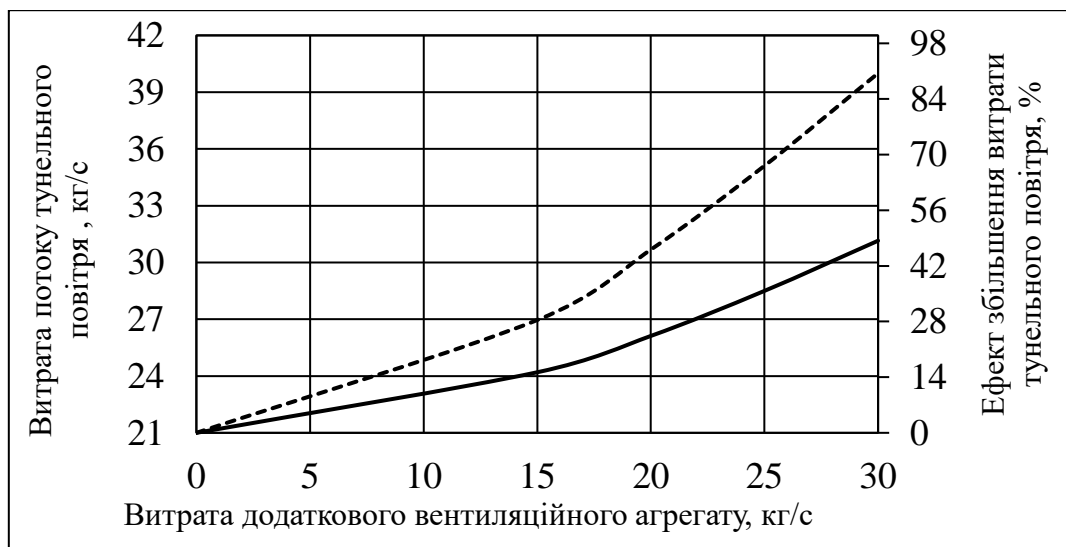


Рис. 4. Залежність витрати потоку тунельного повітря на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» від витрати вентиляційного агрегату при різних кутах виходу потоку повітря з обвідного ходка: — - 45 °; - - - 30 °

При дослідженні збільшення кратності вентиляції за варіантом 2 з'ясовано, що потік повітря з повітропроводу при виході в тунель суттєво гальмується прилеглою оправою стінки тунелю, внаслідок чого в тунелі виникають вихрові зони, які зменшують витрату тунельного повітря (рис. 3, в). Тому встановлення додаткового вентиляційного агрегату в обвідному ходку

з повітропроводом може призвести до збільшення витрати тунельного потоку повітря теоретично майже у 2 рази (рис. 5), але при цьому швидкість повітря в повітропроводі може сягати до 40 м/с, що є неприйнятним через обмеження швидкості руху повітря в магістральних повітропроводах промислової вентиляції до 12 м/с [12].

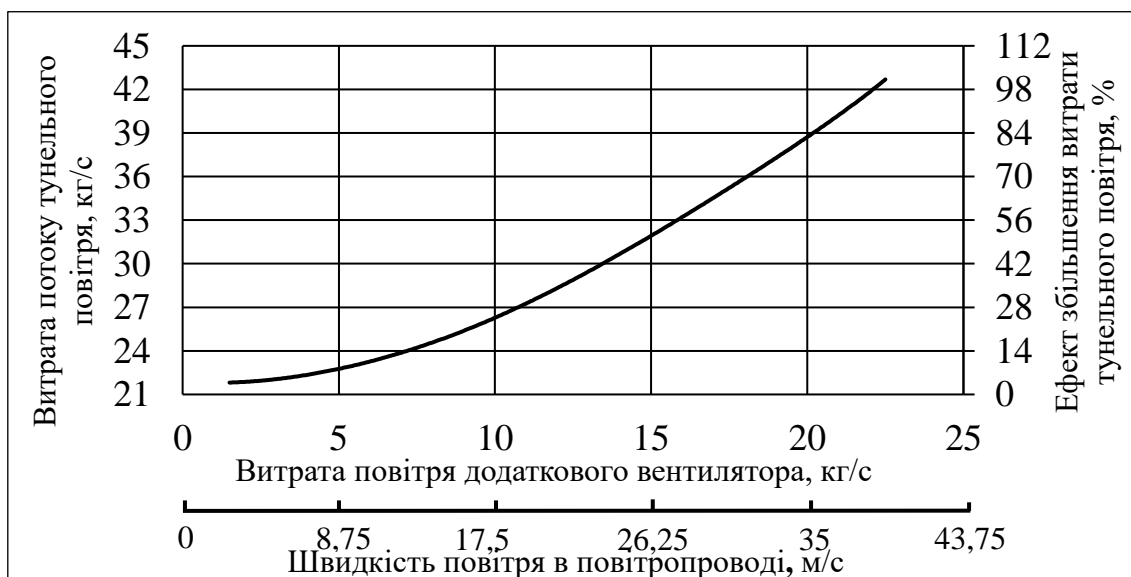


Рис. 5. Залежність витрати потоку тунельного повітря на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» від витрати вентиляційного агрегату та швидкості повітря в повітропроводі

Моделювання тепловологісного режиму ділянки СЗГ-1 проведено також для дати 11.07.2019 року, коли було реалізовано режим нагнітання зовнішнього повітря ВУ115 в СЗГ, на вході в тунель на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» відносна вологість становила 71 %, на виході – 86 %, середня по тунелю – близько 81 % при витраті повітря 21 кг/с. Збільшення витрати

повітря на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» буде відбуватися під дією додаткового вентилятора і ежекційного ефекту за рахунок перерозподілу витрат повітря від роз'їзду до інших станцій СЗГ. Вплив збільшення витрати тунельного повітря на відносну вологість по ділянці СЗГ-1 показано на рис. 6.

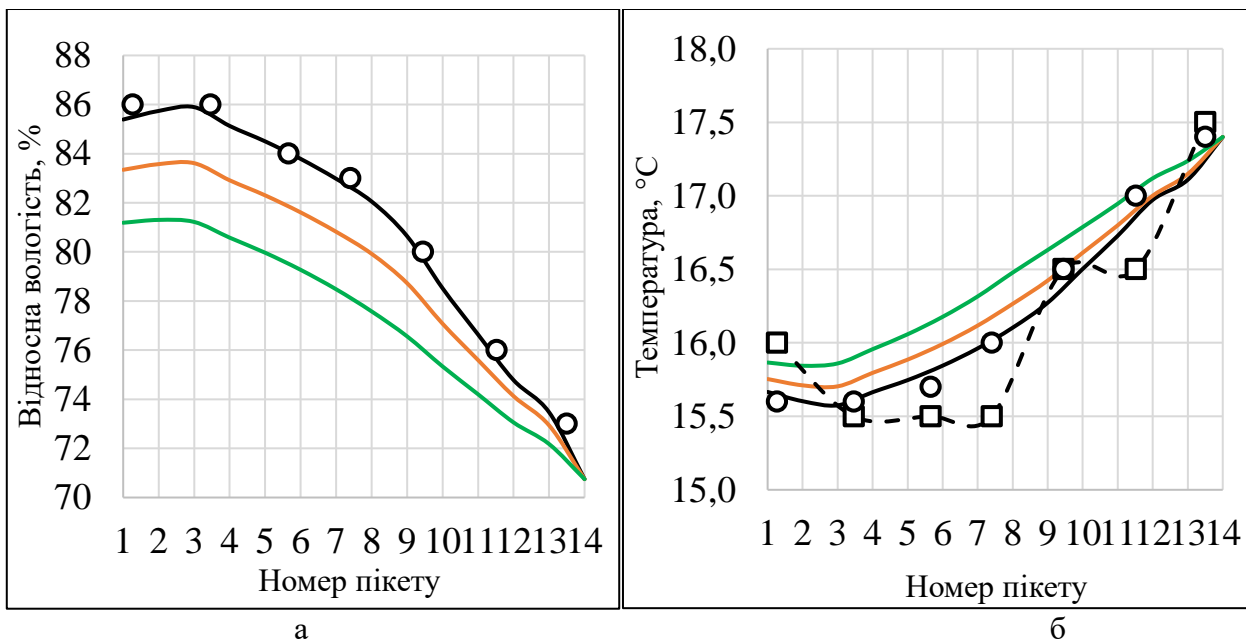


Рис. 6. Залежності по пікетах відносної вологості та температури тунельного повітря і оправи стінки тунелю на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» для дати 11.07.2019 при різних витратах тунельного повітря: — 20 кг/с; — 30 кг/с; — 40 кг/с; ○ - експериментальні значення; - - □ - - - температура оправи стінки тунелю

З рис. 6 видно, що навіть значне збільшення витрати потоку тунельного повітря від 21 до 40 кг/с на ділянці від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» для обох варіантів призведе до зниження вологості повітря лише від 2,5 до 5 %.

Зниження відносної вологості тунельного повітря методом осушування. Суть даного шляху полягає в тому, що в тунелі обвідного ходка буде встановлена промислова машина для осушування повітря, в склад якої входить відцентровий вентилятор, хладоновий компресорно-конденсаторний блок, рекуператор теплової

енергії. Розміщення осушувальної машини в тунелі обвідного ходка в порівнянні з розміщенням у вентиляційному тунелі біля вентиляційної установки 115 (рис. 1, б) має перевагу в тому, що осушування повітря можна організовувати не лише в літній період, коли повітря рухається в напрямку до ст. м. «Хрещатик», а й в зимовий (рух у зворотному напрямі). Під час літнього періоду буде осушуватися частина СЗГ-1 від ПК09+40 до ст. м. «Хрещатик», а в зимовий осушуватиметься частина СЗГ-1 від ПК09+80 до роз'їзду та до вентиляційної шахти 115.

Основним завданням для моделювання є підбір витрати і напору відцентрового вентилятора та характеристики осушення тунельного повітря від вологості конденсаторним блоком. Методом підбору серед запропонованих на ринку України промислових осушувальних машин було вибрано машину з такими технічними характеристиками: витрата повітря 50 000 м³/год (або 11 кг/с), напір 500 Па та інтенсивність осушування повітря 3 г/кг. Тобто осушувальна машина в ходку осушувала і підігрівала від початкової температури близько 50 % витрати тунельного повітря, що надходило від роз'їзду, яке після ходка змішувалося з

іншою частиною (50 %) необробленого тунельного повітря, при цьому загальна витрата тунельного повітря частини СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» зростала від 21 до 27 кг/с або підвищувалася на 28 % (рис. 5), що збільшує кратність вентиляції даної ділянки з 2 до 3.

Для дати 11.07.2019 р. з параметрами осушувальної машини за умови, що температура оправи стінок тунелів дорівнювала 15,3 °С (середнє значення температури у попередні роки від ПК01 до ПК09), було проведено моделювання зниження вологості тунельного повітря, результати якого наведені на рис. 7.

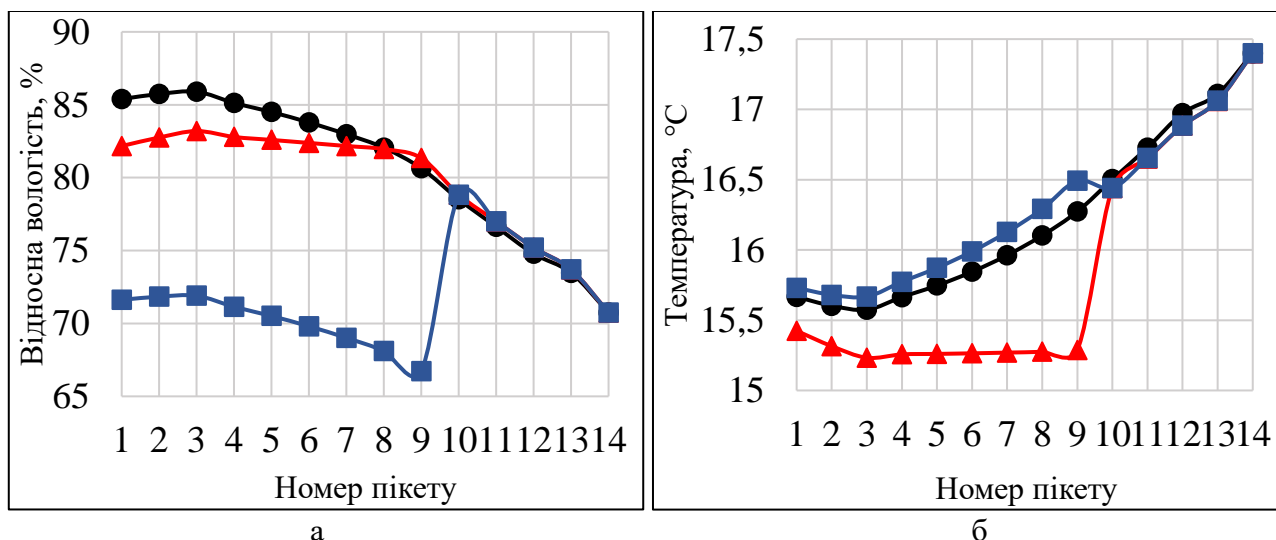


Рис. 7. Залежності зміни відносної вологості (а) та температури тунельного повітря (б) за довжиною СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» при осушуванні повітря:
 ● – експериментальні значення 11.07.2019; характеристики осушування повітря конденсатором: ▲ – 1 г/кг; ■ – 3 г/кг

З рис. 7 видно, що підібрана промислова осушувальна машина з характеристикою осушування повітря 1 г/кг майже призводить до слабкої зміни відносної вологості тунельного повітря лише в межах 3 %. При використанні осушувальної характеристики 3 г/кг зниження вологості відбудеться на 12-14 %.

Зниження відносної вологості тунельного повітря шляхом реалізації

методу осушування має такі недоліки: необхідність використання дорогого обладнання (вартість осушувальної машини сягає близько 200 тис. євро станом на 31.01.2020) і відповідної коштовної амортизації, необхідність прокладання мережі трубопроводів і додаткового встановлення насоса для відведення конденсату, електрична потужність машини становить 212 кВт і неможливе її

підключення через перевищення лімітів, встановлених КП «Київтеплоенерго».

З причини високої вартості та за погодженням з фахівцями КП «Київський метрополітен» шлях зниження відносної вологості повітря способом адсорбції не розглядався.

Зниження відносної вологості тунельного повітря способом нагрівання. Практично розглядається спосіб асиміляції з можливістю регулювання одного параметра – температури тунельного повітря. Суть даного шляху полягає в тому, що в тунелі обвідного ходка буде встановлена тепла гармата з загальною електричною потуж-

ністю 60 кВт (допустима для підключення електрична потужність) для підігрівання тунельного повітря (рис. 8). В склад теплової гармати входить відцентровий вентилятор потужністю 20 кВт (витрата близько 50000 м³/год, або 11 кг/с) та нагрівач повітря з потужністю 40 кВт на базі електричних ТЕНів. Розміщення теплової гармати в тунелі обвідного ходка в порівнянні з розміщенням у вентиляційному тунелі біля вентиляційної установки 115 (рис. 1) має перевагу в тому, що нагрівання повітря можна організувати не лише в літній період, коли повітря рухається в напрямку до ст. м. «Хрещатик», а й в зимовий.



Рис. 8. Теплова гармата

Завданням для моделювання є визначення величини зниження відносної вологості тунельного повітря при заданих параметрах теплової гармати, а також розгляд ефекту від тривалого використання теплової гармати – при зростанні температури оправи стінок тунелів. Для дати 11.07.2019 р. з заданими параметрами теплової гармати було проведено моделювання зниження вологості тунельного повітря, результати якого наведені на рис. 9 і 10.

З рис. 9 і 10 видно, що від початку експлуатації теплової гармати температура тунельного повітря на виході з ходка становитиме 18 °С, відносна вологість 72 %, температура стінок оправи приблизно 15,7°С і вся тепла енергія, яка виділятиметься в тунельне повітря, буде витратитися на прогрівання оправи стінок тунелів (конвективний теплообмін). Оскільки з аналізу експериментальних даних за попередні роки встановлено, що температура стінок оправи тунелів може сягати значення 17 і 18 °С, то в такому випадку були також розглянуті варіанти з ефектами від тривалого використання теплової гармати для даних температур (стаціонарні задачі). З рис. 9 і 10 видно, що з поступовим прогріванням шару ґрунту навколо тунелів до 17 і 18 °С зростає

температура стінок оправи приблизно 15,7°С і вся тепла енергія, яка виділятиметься в тунельне повітря, буде витратитися на прогрівання оправи стінок тунелів (конвективний теплообмін). Оскільки з аналізу експериментальних даних за попередні роки встановлено, що температура стінок оправи тунелів може сягати значення 17 і 18 °С, то в такому випадку були також розглянуті варіанти з ефектами від тривалого використання теплової гармати для даних температур (стаціонарні задачі). З рис. 9 і 10 видно, що з поступовим прогріванням шару ґрунту навколо тунелів до 17 і 18 °С зростає

середнє значення температури тунельного повітря від 17,5 до 18 °С, одночасно з цим зменшується середнє значення відносної вологості повітря з 75,9 до 73 %, тобто

забезпечується нормоване значення. Таким чином, при тривалій дії теплової гармати відносна вологість тунельного повітря може знизитися на (7...11) %.

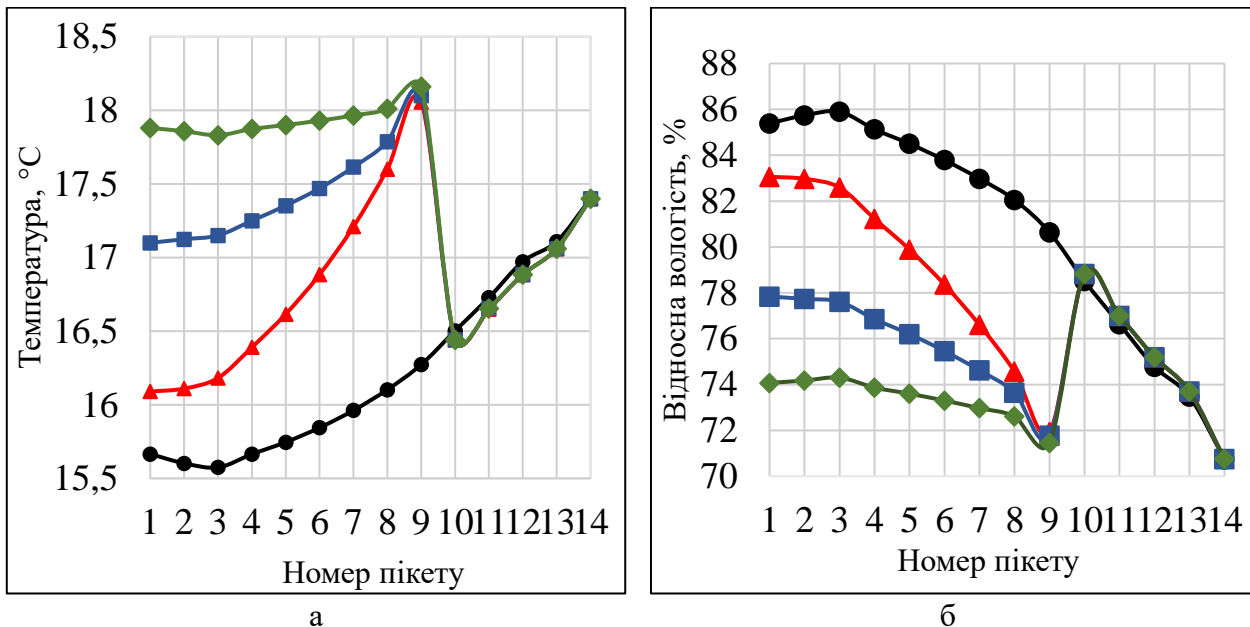


Рис. 9. Залежності температури (а) і відносної вологості (б) тунельного повітря СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик» при нагріванні повітря: ● – експериментальні значення 11.07.2019; електрична потужність нагрівача і температура оправи стінок тунелю: ▲ – 40 кВт при експериментальних температурах оправи стінок тунелю; ■ – 40 кВт і 17°С; ◆ – 40 кВт і 18 °С

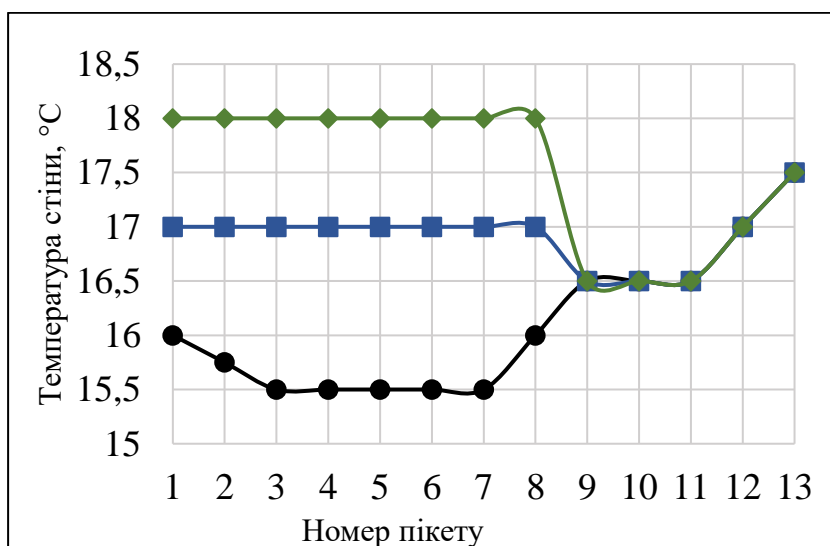


Рис. 10. Залежності температури оправи стінок тунелю СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик»: ● – експериментальні значення 11.07.2019; електрична потужність нагрівача і температура оправи стінок тунелю: ■ – 17 °С; ◆ – 18 °С

Висновки. В статті проаналізовані такі фізичні методи зниження відносної вологості тунельного повітря тунелів глибокого залягання КП «Київський метрополітен» на ділянці СЗГ-1 від роз'їзду до ст. м. «Хрещатик»: збільшення кратності повітрообміну повітрям з меншою абсолютною вологістю, видалення частини вологи з повітря методом конденсації, підвищення температури тунельного повітря шляхом нагрівання.

Зниження відносної вологості тунельного повітря способом збільшення кратності вентиляції тунелів повітрям з меншою абсолютною вологістю за рахунок встановлення додаткового вентиляційного агрегату в обвідному ходку (в районі ПК09+40) та засобів спрямування повітряного потоку за допомогою перегородок з обвідного ходка в тунель під кутом 45° до основного потоку тунельного повітря або направлення повітряного потоку за допомогою повітропроводу перерізом $0,48 \text{ м}^2$ ($600 \times 800 \text{ мм}$) і довжиною 1 м вздовж стінки тунелю паралельно основному потоку (рис. 2) в напрямку ст. м. «Хрещатик» може призвести до збільшення витрати потоку тунельного повітря до 30 і 26 кг/с відповідно, при цьому відносна вологість

знизиться на 5 %. Для реалізації даного способу необхідно затратити електричну потужність 40 кВт.

При реалізації способу осушення тунельного повітря додатковою машиною осушування повітря, розташованою в обвідному ходку, можна знизити відносну вологість на (12...14) % та забезпечувати дотримання нормованої вологості 75 %. Проте реалізація даного способу є енергозатратною у порівнянні з реалізацією способу збільшення повітрообміну, оскільки для осушення необхідна затрата електричної потужності становить близько 212 кВт·год.

За результатами дослідження для КП «Київський метрополітен» рекомендовано спосіб нагрівання тунельного повітря додатково встановленою в обвідному ходку тепловою гарматою з нагрівачем потужністю 40 кВт на базі електричних ТЕНів, що призведе до нагрівання тунельного повітря з одночасним зниженням відносної вологості на (7...11) %, прогрівання шару ґрунту навколо тунелю та уникнення його заохолодження в майбутньому. Практична реалізація способу нагрівання тунельного повітря потребує затрати електричної потужності близько 60 кВт·год.

Список використаних джерел

1. Моделювання вологісного стану тунелів КП «Київський метрополітен» впродовж календарного року / П. Г. Круковський, А. І. Дейнеко, В. С. Олійник, Д. І. Складенко: зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 186. С. 72-86 (doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186422>).
2. Зниження вологості в тунелях КП «Київський метрополітен» шляхом зміни режимів роботи вентиляційних установок / А. І. Дейнеко, П. Г. Круковський, Д. І. Складенко та ін.: зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 183. С. 35-45 (doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.183.2019.169636>).
3. Моделювання тепловологого стану тунелів Київського метрополітену / П. Г. Круковський, О. Ю. Тадля, А. І. Дейнеко та ін. *Електронне моделювання*. 2019. № 3. Т. 41. С. 105-118 (doi: <https://doi.org/10.15407/emodel.41.03.105>).
4. ДБН В.2.3-7-2018. Метрополітени. Основні положення. Чинний від 2019-09-01. Київ: Мінрегіонбуд України, 2019. 70 с.
5. Устройство реверсивной тоннельной вентиляции метрополитенов с частичной рециркуляцией воздуха / О. В. Кашеева, Е. О. Воронов, В. П. Кашеев и др. *Известия высших*

учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: международный научно-технический журнал. 2012. № 1. 64-72.

6. Gyu-Sik K., Youn-Suk S., Jai-Hyo L., In-Won K., Jo-Chun K., Joon-Tae O., Hiesik K. Air Pollution Monitoring and Control System for Subway Stations Using Environmental Sensors. *Sensors and Systems for Environmental Monitoring and Control*. 2016. Vol. 2016. Article ID 1865614. P. 10. <https://doi.org/10.1155/2016/1865614>

7. Цодиков В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Недра, 1975. 560 с.

8. Tétreault J., Bégin P. Silica Gel: Passive Control of Relative Humidity. *Technical Bulletin* 33. 2020-02-21. URL: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/silica-gel-relative-humidity.html> (відвідування ресурсу 29.03.2020).

9. Lahchava O., Pias N. Complex calculation method of temperature, mass transfer potential and relative humidity for ventilation flow in subway. *Journal of Engineering Sciences and Innovation*. 2018. Vol. 3. Issue 1. P. 69-84.

10. Wen Y., Leng J., Shen X., Han G., Sun L., Yu F. Environmental and Health Effects of Ventilation in Subway Stations: A Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. 17. 1084. 37 p. doi:10.3390/ijerph17031084.

11. Li A., Kosonen R., Melikov A., Yang B., Olofsson T., Sørensen B., Zhang L., Cui P., Han O. Ventilation and environmental control of underground spaces: a short review. *E3S Web of Conferences Clima*. 2019. 111. 01039. 5 p. doi: 10.1051/e3sconf/201911101039.

12. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование: учеб. пособ. для вузов / Б. М. Хрусталева, Ю. Я. Кувшинов, В. М. Копко; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Изд. 3-е, испр. и доп. Москва: Изд-во АСВ, 2010. 783 с.

Круковский Павло Григорович, головний науковий співробітник, завідувач лабораторією моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: kruk_2@ukr.net. ORCID iD: 0000-0001-6726-0550.

Дейнеко Андрій Іванович, старший науковий співробітник, лабораторія моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: andriideineko@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-4279-3710.

Дядюшко Євген Валентинович, молодший науковий співробітник, лабораторія моделювання процесів тепломасообміну в об'єктах енергетики і теплотехнологіях, відділ високотемпературної термогазодинаміки Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України. Тел.: (044) 456-92-81. E-mail: 93k41337@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-2601-4633.

Krukovskyi Pavlo Grihorovich, chief scientist, Head of the laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: kruk_2@ukr.net. ORCID iD: 0000-0001-6726-0550.

Deineko Andrii Ivanovich, senior research, laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: andriideineko@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-4279-3710.

Diadiushko Yevhenii Valentinovich, junior researcher, laboratory of heat and mass transfer modeling for energy objects and thermal technologies, department of high-temperature thermogas dynamics, Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Science. Tel.: (044) 456-92-81. E-mail: 93k41337@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-2601-4633.

Статтю прийнято 05.03.2020 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.01

**ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СПОСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ
КАНАЛІЗАЦІЙНИХ КОЛЕКТОРІВ**

Доктори техн. наук Д. Ф. Гончаренко, О. В. Старкова, канд. техн. наук А. І. Алейнікова,
асп. Є. Г. Дегтяр

**THEORETICAL JUSTIFICATION THE CHOICE METHOD OF SEWERAGE
COLLECTORS RESTORATION**

D. Sc. (Tech.) D. Goncharenko, D. Sc. (Tech.) O. Starkova, PhD (Tech.) A. Aleinikova,
postgraduate student Ye. Degtyar

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.213924>

***Анотація.** Статтю присвячено теоретичному обґрунтуванню вибору способу відновлення каналізаційних колекторів. Досліджено основні фактори, що впливають на прийняття рішення щодо традиційного відкритого чи закритого (безтраншейного) способу проведення робіт. Визначено пріоритетність застосування способу відновлення каналізаційного колектора відповідно до експлуатаційних умов. Побудовано математичну модель оптимального вибору способу відновлення каналізаційного колектора з урахуванням обмежень, що враховують фактори, які мають найбільший вплив на такий вибір.*

***Ключові слова:** каналізаційний колектор, знос, корозія, відновлення, відкритий спосіб, безтраншейний спосіб.*

***Abstract.** The article is devoted to the theoretical substantiation of the choice of the method of restoration of sewer collectors. The main factors influencing the decision-making on the traditional open or closed (trenchless) method of work are investigated. Thus, the article summarizes the theoretical approach to justify the choice of method of restoration of sewers based on the study of factors influencing the decision in favor of using the traditional open or closed (trenchless) method of work. Based on research of operational practice and the authors identified sixteen main factors that to some extent affect the choice of method of restoration work on the sewer, namely: depth, diameter, length of the site, the presence of underground utilities, the degree of wear (for survey results), pipeline material, the presence of existing adjacent mines at the site of restoration, linearity of the site, the presence of accidental damage at the site of restoration, building density, the possibility of decommissioning (the presence of a backup line), change the load on the collector from wastewater discharge, coverage of the population, technical equipment of the operating enterprise, distance between inspection mines (taking into account the site of restoration). According to them, the priority of application of the open or closed method of restoration is determined based on the technical characteristics of the collector and the conditions of work. The paper contains the determination of the priority of the method of restoration of the sewer according to operating conditions, in addition, a mathematical model of the optimal choice of the method of restoration of the sewer is proposed, taking into account the limitations that take into account the factors most influencing such choice. Further research can develop the mathematical component of the choice of rational schemes of restoration work, as well as provide computer support for such a choice.*

***Keywords:** sewer collector, wear, corrosion, repair, brick.*

Вступ. Діагностика технічного стану розподільчих мереж водовідведення та їх експлуатація понад 40 років свідчить про аварійний стан більшості з них. Сьогодні досвід експлуатації каналізаційних колекторів вказує на неможливість забезпечення їх працездатності та стійкого функціонування без обґрунтування техніко-економічних показників проєкту відновлення аварійних ділянок. Динаміка виникнення аварійних ситуацій на каналізаційних колекторах показує, що за останні п'ять років кількість аварійних ситуацій на мережах водовідведення, що було прокладено у 80-90-их роках минулого сторіччя, майже в 5 разів перевищує цей показник у порівнянні з 2014 роком. Останнім часом значна частина аварій припадає на каналізаційні колектори з діаметром понад 800 мм. Також слід виділити складові експлуатації каналізаційних колекторів, адже аварії та відмови в їх роботі призводять до очевидних економічних, екологічних і соціальних наслідків, що є недопустимим в умовах євроінтеграції України в рамках європейських вимог до навколишнього середовища та Водної рамкової директиви Європейського Союзу [1]. Економічна складова забезпечення працездатності каналізаційних колекторів постає особливо гостро в умовах обмежених фінансових ресурсів експлуатуючих підприємств України. Отже, питання обґрунтування доцільності вибору раціонального способу проведення відновлювальних робіт на каналізаційних колекторах за рахунок економії матеріальних ресурсів є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існує безліч інструментів, моделей та алгоритмів, що допомагають у виборі доцільного способу виконання робіт з відновлення каналізаційних колекторів. Хоча одна з ключових проблем полягає в тому, що якийсь метод або методика забезпечує оптимальне рішення лише для однієї ділянки каналізаційного колектора, в той час як

умови виконання робіт змінюються вздовж траси ремонту. В роботі [2] представлений алгоритм багатосегментного вибору методу безтраншейної технології для підземних трубопроводів різного призначення. На підставі досвіду експлуатації помічено, що більшість реальних випадків аварійних ситуацій включає кілька ділянок колектора під планове відновлення. Хоча використання різних методів для кожної окремої ділянки є кращим рішенням, воно може виявитися неможливим при ширшому розгляді вартості, якості та часу реалізації відновлення. На сьогодні велике значення має екологічність прийнятих рішень у питанні ефективності застосування способу відновлення каналізаційного колектора. В роботі [3] представлені дослідження щодо екологічної складової відновлення інженерних мереж як відкритим, так і безтраншейним способами. На основі розробленої методики розрахунку порівнюються енергоспоживання та вуглецевий слід зазначених способів в аналогічних умовах їх проведення. Встановлено, що різні безтраншейні технології дозволили в різному ступені знизити споживання енергії та вуглецевий слід у порівнянні з відкритим способом. Однак дослідження показали, що при незначній протяжності і глибині закладення ділянки енергоспоживання та вуглецевий слід безтраншейного способу можуть бути вищими, ніж у відкритого способу. У зв'язку зі зростаючою стурбованістю з приводу глобального потепління та парникових газів існує гостра потреба у кількісній оцінці і зниженні впливу на навколишнє середовище процесу ремонту розподільчих мереж. Авторами зазначено [4], що по суті кожен проєкт відновлення впливає на навколишнє середовище, для експлуатуючої організації важливо оцінити цей вплив і вжити необхідних заходів, щоб мінімізувати будь-які негативні наслідки. У ході дослідження створено документ, який відображає багаторічні дослідження впливу на навколишнє середовище, де зазначено

зростання антропогенного навантаження за останні кілька років [4]. В роботі [5] запропоновано модель вибору технології ремонту з використанням нечіткої логіки. У моделі були сформульовані параметри оцінки обраних пропозицій. Слід зазначити, що ця модель потребує доопрацювання, зважаючи на обмежений спектр показників, у той час як кожен новий випадок індивідуальний і потребує більш вузького рішення. У роботах [6-10] подано сучасні технології ремонту каналізаційних колекторів, зокрема безтраншейні та традиційні. Зазначено [6], що нова технологія Pipe-in-Line має низку переваг за рахунок конструкції нової тканинно-армованої гнучкої пластикової труби (FRFPP). Водночас вартість залишається високою на коротких ділянках відновлення. В роботі [7] представлені технології з руйнуванням існуючого колектора, а також облицювальні методи. Стаття [8] присвячена порівняльному аналізу застосування відкритого способу та безтраншейного. В ході дослідження було розглянуто два варіанти: використання конструкційних панелей зі склопластику, з використанням футерування з полімерної труби CIPP. Порівняння швидкості потоку стічних вод у каналізаційному колекторі показало перевагу труби CIPP. Незважаючи на суттєвий доробок вітчизняних та закордонних вчених, актуальним залишається питання теоретичного обґрунтування вибору способу відновлення каналізаційних колекторів залежно від існуючих умов виконання робіт.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є теоретичне обґрунтування вибору способу відновлення каналізаційних колекторів.

Для досягнення мети дослідження поставлені такі завдання:

- дослідити фактори, що впливають на прийняття рішень щодо способу відновлення каналізаційного колектора;

- визначити пріоритетність застосування відкритого та закритого способу відновлення;

- з використанням методу експертного оцінювання виконати ранжування факторів за критерієм їх впливу на вибір способу відновлення каналізаційного колектора на етапі прийняття рішення.

Основна частина дослідження. На підставі досліджень експлуатаційної практики авторами було визначено шістьнадцять основних факторів, що в тій чи іншій мірі впливають на вибір способу проведення відновлювальних робіт на каналізаційному колекторі, а саме: глибина залягання, діаметр, довжина ділянки, наявність підземних інженерних мереж, ступінь зносу (за результатами обстеження), матеріал трубопроводу, наявність існуючих прилеглих шахт на ділянці відновлення, лінійність ділянки, наявність аварійного пошкодження на ділянці відновлення, щільність забудови, можливість виведення з експлуатації (наявність дублюючої лінії), зміна навантаження на колектор від скидання стічних вод, місце проведення робіт, охоплення населення, технічна комплектація експлуатуючого підприємства, відстань між оглядовими шахтами (з урахуванням ділянки відновлення). Відповідно до них визначено пріоритетність застосування відкритого чи закритого способу відновлення виходячи до технічної характеристики колектора та умов проведення робіт (табл. 1).

З використанням методу експертного оцінювання фахівцями в галузі каналізаційного господарства виконано ранжування факторів у порядку зростання або зменшення залежно від ступеня їх впливу на вибір способу проведення робіт [11]. При визначенні ступеня впливу експерт давав оцінку (з 1 по 16) кожному з факторів у порядку, який йому вважається найбільш раціональним, а саме: при присвоєнні оцінки 1 фактор отримує найбільш високий рівень значущості, а оцінка 16 – найменший. Отже, порядкова шкала, що отримується в результаті ранжирування, має задовольняти умову рівності числа рангів «16» числу ранжуваних факторів «n» [11]. Отримані експертні дані зведено в таблицю рангів (табл. 2).

Таблиця 1

Пріоритетність застосування відкритого та закритого способу відновлення

Фактор (Φ_n)	Спосіб відновлення	
	Відкритий	Закритий
1	2	3
1. Глибина залягання, м		
≤ 3	++	+
3-5	+	+
> 5	+	++
2. Діаметр, мм		
≤ 600	*	*
600 – 1000	*	*
> 1000	*	*
3. Довжина ділянки, м		
≤ 15	++	+
15 – 50	++	+
50 – 150	+	+
> 150	+	++
4. Наявність підземних інженерних мереж		
вузол перетину	–	+
незначна кількість або відсутні	+	+
невідомо	–	+
5. Ступінь зносу (за результатами обстеження)		
висока (провал склепіння, значна корозія, заростання, наявність свищів, тріщини і т. д.)	++	+
середня (наявність корозії, заростання і т. д.)	+	+
низька (поява корозії, одиночні пошкодження)	+	+
6. Матеріал трубопроводу		
залізобетон	*	*
кераміка	*	*
сталь	*	*
поліетилен	*	*
7. Наявність існуючих прилеглих шахт на ділянці відновлення		
так	+	+
ні	+	–
8. Лінійність ділянки		
кути повороту	+	–
лінійна	+	+
9. Наявність аварійного пошкодження на ділянці відновлення		
так	++	+
ні	+	+
10. Щільність забудови		
щільна	–	++
ділянка відновлення за межами міста	++	+

Продовження табл. 1

1	2	3
11. Можливість виведення з експлуатації (наявність дублюючої лінії)		
так	*	*
ні	*	*
12. Зміна навантаження на колектор від скидання стічних вод		
зменшення навантаження	+	+
збільшення навантаження	++	-
13. Місце проведення робіт		
наявність дорожнього покриття, густих зелених насаджень, некапітальних споруд	-	++
відсутність асфальтного покриття, незначні зелені насадження	+	+
14. Охоплення населення, тис. люд		
≤ 5	*	*
5-15	*	*
> 15	*	*
15. Технічна комплектація експлуатуючого підприємства		
повна комплектація	+	++
часткова комплектація	+	+
відсутність необхідного обладнання	+	-
16. Відстань між оглядовими шахтами з урахуванням ділянки відновлення, м		
≤ 50	+	+
50-100	+	+
> 100	+	-

Таблиця 2

Результати опитування експертів у галузі каналізаційного господарства

№ з/п	Експерт					Сума
	1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	6	7
Ф1	2	1	2	3	3	11
Ф2	14	14	13	16	15	72
Ф3	12	10	11	12	11	56
Ф4	4	4	6	5	4	23
Ф5	7	8	7	7	7	36
Ф6	15	16	14	13	14	72
Ф7	11	12	12	10	12	57
Ф8	8	7	8	9	9	41
Ф9	5	6	4	4	5	24
Ф10	1	2	1	1	2	7
Ф11	13	13	15	15	16	72
Ф12	9	9	9	8	8	43

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Ф13	6	5	5	6	6	28
Ф14	16	15	16	14	13	74
Ф15	3	3	3	2	1	12
Ф16	10	11	10	11	10	52

У результаті аналізу таблиці стандартизованих рангів і проведених розрахунків отримано коефіцієнт множинної рангової конкордації, що дорівнює 0,90, що вказує на високий ступінь узгодженості думок в обраній групі експертів [11].

Діаграму сумарних рангів досліджуваних факторів, що впливають на пріоритетність застосування відкритого та закритого способу відновлення, за результатами експертного оцінювання подано на рисунку.

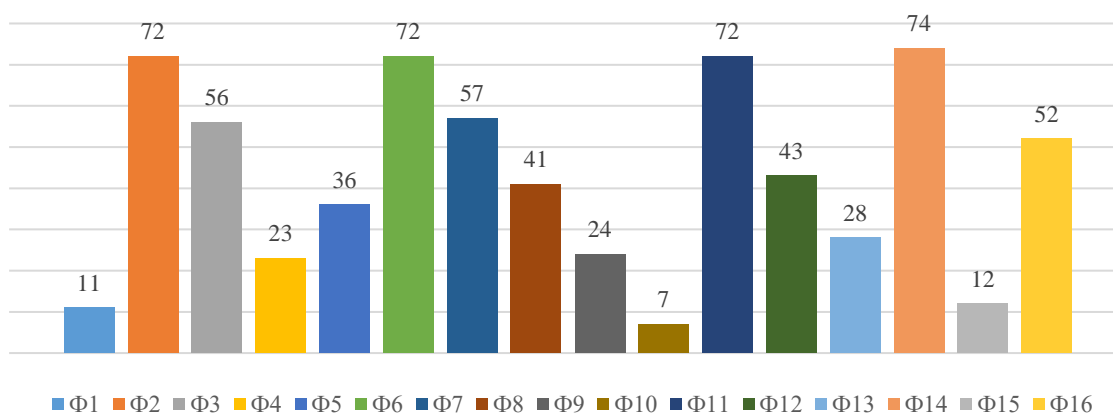


Рис. Діаграма сумарних рангів досліджуваних факторів за результатами експертного оцінювання

За результатом отриманих даних визначено, що фактори Ф10 (щільність забудови), Ф1 (глибина залягання), Ф15 (технічна комплектація експлуатуючого підприємства) мають найбільший вплив на вибір способу відновлення каналізаційного колектора на етапі прийняття технічного рішення.

Отже, відповідно до проведених досліджень пріоритетності використання відкритого чи закритого способу відновлення від заданих умов та визначення ступеня впливу кожного окремого фактора в подальшому актуальною є побудова моделі визначення доцільності вибору традиційного відкритого чи закритого

(безтраншейного) способу відновлення каналізаційного колектора для конкретних заданих умов.

Використовуючи наявний досвід побудови оптимізаційних моделей вибору раціональних схем ремонтно-відновлювальних робіт [10], побудовано математичну модель вибору способу відновлення каналізаційного колектора з урахуванням обмежень, що враховують фактори, які мають найбільший вплив на такий вибір та відібрані раніше.

За умови вибору вартості комплексу ремонтних робіт як критерію оптимізації, математична постановка задачі має такий вигляд:

$$\sum_{i=1}^n c_i \cdot l \cdot x_i \rightarrow \min,$$

$$\begin{cases} x_i \in \{0,1\}, & i = \overline{1,n}; \\ \sum_{i=1}^{n_i} x_i = 1; \\ h_i \in H_{i_k}, & k = \overline{1,m}; \\ p_i \in P_{i_r}, & r = \overline{1,s}; \\ z_i \in Z_{i_v}, & v = \overline{1,w}, \end{cases}$$

де i – номер способу ремонту та відновлення; $i = \overline{1, \dots, n}$;

n – кількість способів ремонту;

c_i – вартість комплексу ремонтних робіт (включаючи вартість матеріалів та вартість виконання робіт) для 1 пог. М каналізаційного колектора i -м способом;

l – протяжність ділянки, що ремонтується, м;

x_i – логічна змінна, що відображає факт вибору i -го способу ремонту:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо вибраний } i \text{ – тий спосіб ремонту,} \\ 0, & \text{у протилежному випадку;} \end{cases}$$

h_i – глибина залягання, що має відповідати рекомендаціям H_{i_k} щодо вибору способу відновлення, наданим у табл. 1;

k – кількість інтервалів, в які може потрапити змінна h_i ;

p_i – щільність забудови, що має відповідати рекомендаціям P_{i_r} щодо вибору способу відновлення, наданим у табл. 1;

r – кількість інтервалів, в які може потрапити змінна p_i ;

z_i – технічна комплектація експлуатуючого підприємства, що має відповідати рекомендаціям Z_{i_v} щодо вибору способу відновлення, наданим у табл. 1;

v – кількість інтервалів, в які може потрапити змінна z_i .

Аналогічно можна сформулювати математичну модель оптимізаційної задачі за критерієм мінімальної тривалості комплексу ремонтних робіт.

Висновки. Таким чином, стаття узагальнює теоретичний підхід щодо обґрунтування вибору способу відновлення каналізаційних колекторів на основі дослідження факторів, що впливають на прийняття рішення на користь використання традиційного відкритого чи закритого (безтраншейного) способу проведення робіт. Робота містить визначення пріоритетності застосування способу відновлення каналізаційного колектора відповідно до експлуатаційних умов, крім того, запропоновано математичну модель вибору оптимального способу відновлення каналізаційного колектора з урахуванням обмежень, що враховують фактори, які мають найбільший вплив на такий вибір. Подальші дослідження можуть розвивати математичну складову вибору раціональних схем відновлювальних робіт, а також здійснювати комп'ютерну підтримку такого вибору.

Список використаних джерел

1. Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради про встановлення рамок діяльності Співтовариства у сфері водної політики. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua>.

2. Matthews J. C. Et al. Multi-segment trenchless technology method selection algorithm for buried pipelines. *Tunnelling and underground space technology*, 2018. Vol. 73. P. 295-301.
3. Lu H., Matthews J., Iseley T. How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2020. P.121215.
4. Kaushal V., Najafi M., Serajiantehrani R. Environmental Impacts of Conventional Open-Cut Pipeline Installation and Trenchless Technology Methods: State-of-the-Art Review. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2020. № 11(2). P.03120001.
5. Zwierzchowska A., Kuliczowska E. The selection of the optimum trenchless pipe laying technology with the use of fuzzy logic. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019. Vol. 84. P. 487-494.
6. Najafi M., CUIRE U. T. A. North American Society for Trenchless Technology (NASTT) NASTT's 2019 No-Dig Show Chicago, Illinois March, 2019.
7. Tie S. Application of Trenchless Construction Technology in Construction of Water Supply and Drainage in Urban Road Construction. *Urban Transportation & Construction*, 2017. Vol. 3(1). P. 7-13.
8. Tomczak E., Zielińska A. Example of sewerage system rehabilitation using trenchless technology. *Ecological Chemistry and Engineering*, 2017. Vol. 24(3). P. 405-416.
9. Каналізаційні тунелі Харкова: QUO VADIS? / Д. О. Бондаренко, В. В. Булгаков, О. О. Гармаш та ін.; за заг.ред. Д. Ф. Гончаренка. Харків: Раритети України, 2018. 232 с.
10. Методологічні основи подовження експлуатаційного ресурсу підземних інженерних мереж / А. І. Алейнікова, В. М. Волков, Д. Ф. Гончаренко та ін.; за заг.ред. О. В. Старкової. Харків: Раритети України, 2018. 320 с.
11. Метод експертних оцінок. URL: <https://math.semestr.ru/corel/concordance.php>.

Гончаренко Дмитро Федорович, д-р техн. наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел. (057) 700-02-40. E-mail: gonch@kstuca.kharkov.ua. ORCID iD: 0000-0003-1278-0895.

Старкова Ольга Володимирівна, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел. (066) 059-33-41. E-mail: starkova.olha@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-9034-8830.

Алейнікова Алевтина Ігорівна, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельного виробництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел. (066) 291-31-87. E-mail: alevtynaal222@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-2486-4263.

Дегтяр Євгеній Геннадійович, аспірант кафедри технології будівельного виробництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел. (066) 299-58-79. E-mail: evgeniydegtyar.kh@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-7218-2179.

Goncharenko Dmitry, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Building Technology, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture (KNUCEA). Tel. (057) 700-02-40. E-mail: gonch@kstuca.kharkov.ua. ORCID iD: 0000-0003-1278-0895.

Starkova Olha, D. Sc. (Tech.), Head of Department, Department of Computer Science and Information Technology, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture (KNUCEA). Tel.: 066-059-33-41. E-mail: starkova.olha@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-9034-8830.

Aleinikova Alevtyna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Building Technology, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture (KNUCEA). Tel. (066) 291-31-87. E-mail: alevtynaal222@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-2486-4263.

Degtyar Yevgeniy., Postgraduate student of Department of building technology, Kharkiv National University of Construction and Architecture (KNUCEA). Tel. (066) 299-58-79. E-mail: evgeniydegtyar.kh@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-7218-2179.

Статтю прийнято 18.03.2020 р.

УДК 624.012.35:620.173/174

МОДЕЛЮВАННЯ ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Старш. викл. О. В. Ромашко-Майструк

MODELING OF REINFORCEMENT-CONCRETE ADHESION IN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Sr. Lecturer O. V. Romashko-Maistruk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.213925>

Анотація. Розроблено загальну модель зчеплення арматури з бетоном, яка залишається актуальною для будь-якої стадії деформування залізобетонних елементів. Від інших моделей вона відрізняється відносною простотою та спрямованістю на задоволення основних вимог інженерів-проектувальників. В її основу покладено функцію універсального параметра – зусилля зчеплення арматурного стержня з бетоном уздовж поверхні їх контакту. Вказані зусилля рекомендується визначати за допомогою середніх напружень зчеплення арматури з бетоном, функція яких є нелінійною по відношенню до нормальних напружень в арматурі. Отримано залежності з визначення напружень взаємодії арматури з бетоном на різних ділянках залізобетонного елемента.

Ключові слова: залізобетонні елементи, модель, зчеплення, критерій, арматура, бетон.

Abstract. The research is based on mathematical modeling of the adhesion parameters of the reinforcement with concrete along the conditional cylindrical surface of their contact. The detailed classification and thorough critical analysis of existing models of reinforcement to concrete adhesion by mathematical solution and schemes of their contact interaction are given. A general model of reinforcement to concrete adhesion has been developed, which remains relevant for any stage of reinforced concrete elements deformation. It differs from other models in its relative simplicity and in that it is aimed at satisfying the basic requirements of design engineers. The developed model is based on the function of a universal parameter - the adhesion forces of reinforcement to concrete along its conditional cylindrical surface. It is substantiated why the limiting values of the adhesion forces in the area between normal cracks remain unchanged and equal to the limiting forces in tensile concrete. It is recommended to determine the bond forces in the simplest way using the average bond stresses between reinforcement and concrete in the areas between two adjacent normal cracks.

It has been established that, in relation to normal stresses in the reinforcement itself, the function of average bond stresses is nonlinear. An analytical dependence is proposed for determining the normalized value of the coefficient, taking into account the index of reinforcement to concrete adhesion. These dependences are obtained for determining the most important power parameters (both forces and stresses) of the interaction of reinforcement with concrete and calculating the levels of their adhesion at any stage of reinforced concrete element and structures deformation.

It is proposed to associate the development of processes of local violation of adhesion between reinforcement and concrete with the levels of formation and opening of normal cracks in reinforced concrete elements. At the same time, the force criterion for breaking the bond between reinforcement and concrete is tied to the extreme criterion of concrete tensile strength.

Keywords: reinforced concrete elements, model, adhesion, criterion, reinforcement, concrete.

Вступ. Побудова загальної теорії зчеплення арматури з бетоном продовжує й надалі залишатися одним із основних завдань в теорії залізобетону. Сьогодні, із запровадженням в практику проектування так званих деформаційних методик, його значимість починає ще більше зростати. Однак і досі переважна більшість методик розрахунку залізобетонних елементів та конструкцій, у тому числі і за чинними нормативними документами [1, 2], взаємодію арматури з бетоном враховують лише опосередковано або ж повністю ігнорують.

Загалом відомо, що зчеплення арматури з бетоном залежить від надзвичайно великої кількості різноманітних факторів. Їх спільний вплив на взаємодію арматури з бетоном врахувати вкрай складно і навіть практично неможливо. Тому зосередитись слід на найбільш важливих та визначальних факторах, що впливають не тільки на міцність зчеплення [3] чи на взаємні зміщення бетону і арматури [4, 5], але й на зусилля зчеплення в першу чергу [6, 7]. Саме останні можна доволі легко контролювати у найпростіший спосіб.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження зчеплення арматури з бетоном продовжують виконуватися за трьома напрямками:

- вивченням основних параметрів, що найбільше впливають на міцність зчеплення арматури з бетоном [3];
- виявленню загальних закономірностей взаємних зміщень бетону і арматури [4, 5];
- моделюванням зчеплення арматури з бетоном за допомогою числових методів [4].

На жаль, неоднозначність результатів, отриманих в зазначених роботах, слабо сприяє розвитку загальної теорії зчеплення арматури з бетоном. Тому очевидно, що більш важливу роль у розбудові останньої слід відвести не числовим, а аналітичним моделям взаємодії арматури з бетоном. Згадані моделі зчеплення арматури з

бетоном можна умовно поділити на лінійні, нелінійні, диференційовані та варіаційні.

Найбільш поширені нелінійні моделі, що представляють в основному степеневими [8] і показниковими [9] залежностями, дробовими [10] та сплайн-функціями [4], неможливо використати як узагальнені. Основна проблема полягає в тому, що згідно з результатами переважної більшості експериментальних досліджень діаграма зчеплення арматури з бетоном уздовж ділянки їх контакту постійно змінюється і її не можна описати єдиною функцією.

В диференційованих моделях мінливість діаграм зчеплення арматури з бетоном уздовж ділянки їх контакту описують сімейством вищезгаданих однотипних залежностей [11]. Однак їх використання в практичних розрахунках призводить до вкрай громіздких рішень.

Варіаційні моделі [12] дозволяють доволі точно моделювати напружено-деформований стан бетону в характерних зонах контакту з арматурою. Однак складність визначення механічних характеристик бетону в цих зонах виключає можливість використання цих моделей в практичних розрахунках.

Тому, виходячи зі сказаного, в основу розрахунків зчеплення арматури з бетоном доцільно закладати числові [4] або лінійні аналітичні моделі [6, 13].

Застосування числових моделей дозволяє отримувати більш точні рішення задач взаємодії арматури з бетоном. Їх реалізація є можливою лише за допомогою спеціальних комп'ютерних програм, але при цьому доводиться іти на певну втрату фізичної сутності процесів деформування залізобетонних елементів. Рішення на основі лінійних моделей можуть бути настільки простими, що в окремих випадках дозволять створювати експрес-методи розрахунку залізобетонних елементів з урахуванням зчеплення арматури з бетоном.

Мета та завдання досліджень. Дані дослідження спрямовані на розробку як узагальненої моделі, так і загального методу

розрахунку зчеплення арматури з бетоном, що були б прийнятними для будь-якої стадії деформування залізобетонних елементів. В основу обох доречно покласти зусилля зчеплення арматурного стержня з бетоном уздовж циліндричної поверхні їх контакту. Тому основним завданням цих досліджень є формування критерію локального порушення зчеплення арматури з бетоном в процесі утворення і розвитку тріщин в залізобетонному елементі.

Основна частина досліджень.

Узагальнену модель зчеплення арматури з бетоном будуватимемо на засадах механіки деформованого твердого тіла (МДТТ) за загальновідомою та поширеною в деформаційно-силовій моделі ДСМ [14] системою статичних, геометричних і фізичних співвідношень. Ця система дозволяє контролювати напружено-деформований стан залізобетонного елемента на будь-якій стадії його деформування.

Визначальними елементами розроблюваної моделі слугують основні параметри та критерії, за допомогою яких можна встановлювати момент та місце локального порушення зчеплення арматури з бетоном.

Основною ознакою локального порушення зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах є утворення в них тріщин. Зазвичай виникнення тріщин характеризують лише моментом їх утворення. Його фіксують за екстремальним критерієм несучої здатності розтягнутого бетону (критерієм Ферма) $dM_{ct} / d(1/r) = 0$ чи $dN_{ct} / d\varepsilon_{ct} = 0$ [15], що дозволяє встановити ще й граничну деформативність розтягнутого бетону ε_{ctu} .

Водночас в теорії тріщиностійкості більш важливо знати місце (крок) утворення тріщин. Встановити їх поза зусиллями зчеплення арматури з бетоном N_{bd} неможливо. Завдяки результатам численних експериментальних досліджень можна стверджувати, що ці зусилля не можуть перевищувати максимальних зусиль в розтягнутому бетоні $N_{ct,cr}$ (рис. 1). Тобто критерій

$$N_{bd,cr} = N_{ct,cr} \quad (1)$$

характеризує локальне (місцеве) порушення зчеплення арматури з бетоном в момент утворенням нормальних тріщин.

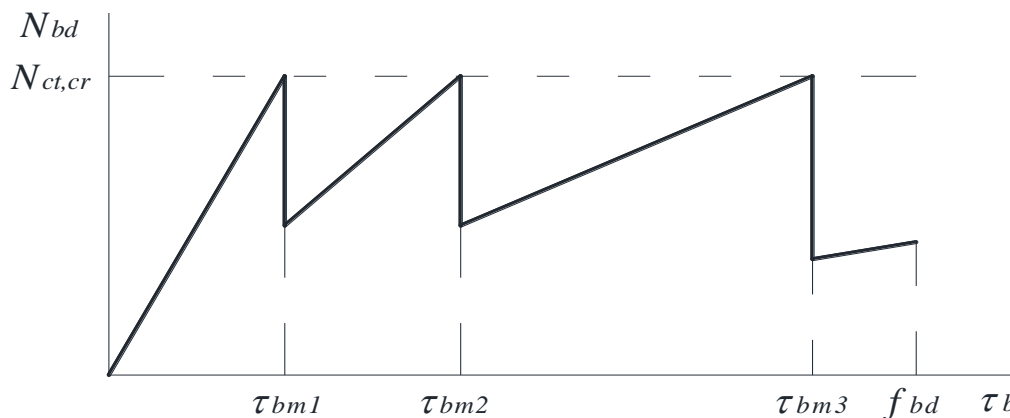


Рис. 1. Графік зміни сил зчеплення арматури з бетоном в процесі деформування залізобетонного елемента

Значення вказаних зусиль на ділянках між тріщинами пропонується розрахувати

за допомогою нелінійної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном [6, 15]

$$\tau_{bmi} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} \cdot (\sigma_{si} / \sigma_{s,max})^{1-1/\eta_1}, \quad (2)$$

де σ_{si} – найбільші напруження в арматурі на ділянці активного зчеплення за певної стадії деформування залізобетонного елемента; $\sigma_{s,max}$ – максимально можливі напруження в розтягнутій арматурі на ділянці активного зчеплення з розтягнутим бетоном, не можуть перевищувати граничних значень ($\sigma_{s,max} \leq f_{yk}$); η_2 – коефіцієнт, що враховує вплив діаметра

арматури, можна приймати за чинними нормами [1, 2].

Для нормування значень коефіцієнта η_1 (рис. 2), який враховує профіль арматури за індексом зчеплення f_R , пропонується користуватися залежністю (3), що має довірчий інтервал 2σ (σ – стандартне відхилення)

$$\eta_1 = 1 + 29 \cdot f_R - 120 \cdot f_R^2. \quad (3)$$

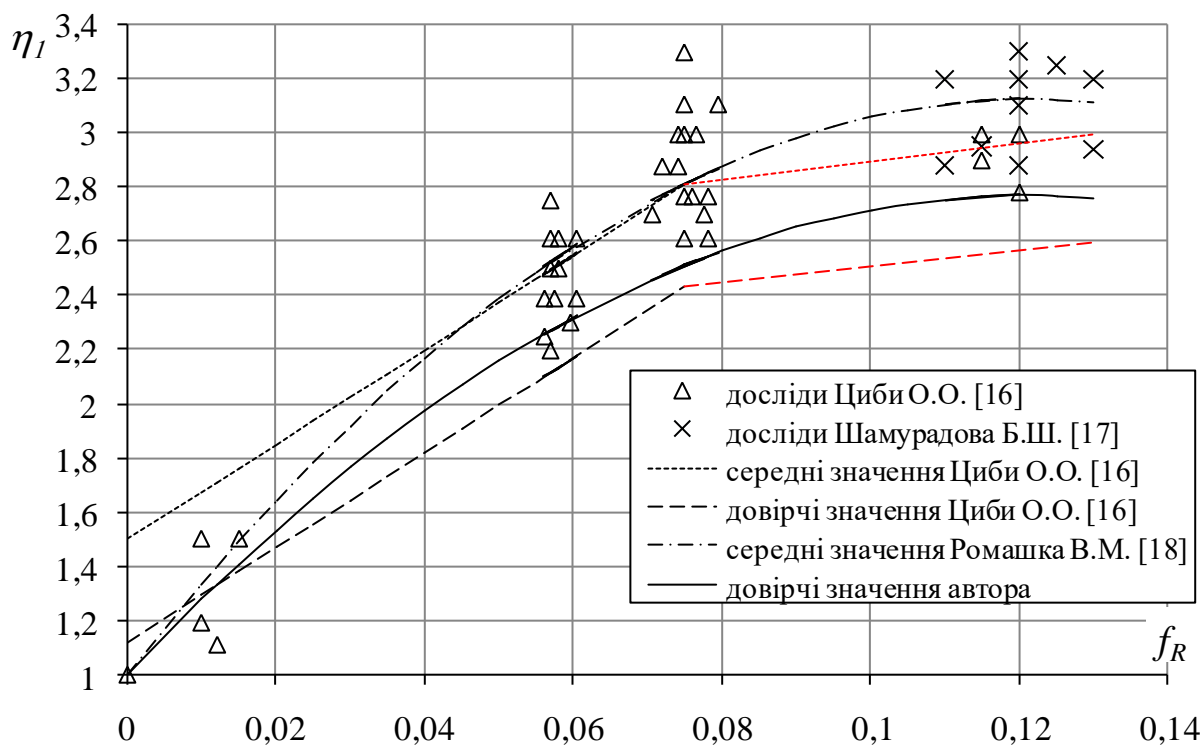


Рис. 2. Залежність коефіцієнта η_1 від індексу зчеплення f_R

Пріоритетність розрахунку зусиль зчеплення N_{bd} за нелінійною функцією (2), відносно лінійної залежності (4) [13]

$$\tau_{m,i} = f_{ctm} \cdot ((\eta_1 \cdot \eta_2 - 0,4) \cdot \sigma_{si} / f_{yd} + 0,4), \quad (4)$$

обґрунтовано статистично, про що свідчать результати відповідного порівняння (таблиця).

Порівняння теоретичних та дослідних значень середніх напружень зчеплення арматури з бетоном

Автори досліджень	Профіль та діаметр арматури, мм	Відхилення від дослідних даних					
		за формулою автора (2)			за лінійною функцією (4)		
		Δ	σ	$\nu, \%$	Δ	σ	$\nu, \%$
Кольнер В. [19]	періодичний, 20	1,00	1,73	1,73	1,08	5,27	4,88
Adrouche К. [20]	періодичний, 16	0,995	2,00	2,01	1,01	2,32	2,30
Rashedul К. [21]	періодичний, 20	0,994	2,29	2,30	1,051	4,48	4,26
Самошкин А. [22]	періодичний, 16	0,998	2,28	2,29	1,023	2,76	2,70

Якщо керуватися узагальненим критерієм порушення зчеплення арматури з бетоном (1), то для залізобетонного елемента на ділянках між суміжними тріщинами можна записати

$$N_{bd,cri} = N_{bd,rci+1}, \quad (5)$$

де $N_{bd,cri}$ і $N_{bd,rci+1}$ – зусилля активного зчеплення арматури з бетоном, що відповідають утворенню тріщин попереднього та наступного рівнів відповідно.

За графічним зображенням зазначеного критерію (рис. 1) видно, що при утворенні будь-якої нової тріщини граничні зусилля зчеплення $N_{bd,cr}$ на ділянці між суміжними тріщинами залишаються незмінними та рівними граничному зусиллю в розтягнутому бетоні $N_{ct,cr}$. Тоді для центрально розтягнутого елемента (рис. 3) завжди зберігатиметься така рівність:

$$\tau_{bm1} \cdot s_{r1} = \tau_{bm2} \cdot s_{r2}, \quad (6)$$

де s_{r1} і s_{r2} – відстані між тріщинами першого і другого рівнів відповідно;

τ_{bm1} і τ_{bm2} – середні напруження в зонах між тріщинами тих же рівнів відповідно.

Слід також зазначити, що рівність (5), хоч і в дещо іншому вигляді

$$\tau_{bm2,1} \cdot s_{r2,1} = \tau_{bm2,2} \cdot s_{r2,2}, \quad (7)$$

залишається актуальною і для згинальних елементів [15].

Висновки. Отримані результати дозволяють зробити низку таких висновків та пропозицій:

- взаємодію арматури з бетоном доцільно моделювати за допомогою зусиль зчеплення, оскільки їх граничні значення залишаються незмінними в процесі деформування залізобетонного елемента;
- зусилля зчеплення варто розраховувати у найпростіший спосіб з використанням середніх напружень зчеплення арматури з бетоном;
- залежність середніх напружень зчеплення від нормальних напружень в самій арматурі є нелінійною;
- регламентування розрахунків тріщиностійкості залізобетонних елементів за параметрами зчеплення арматури з бетоном сприятиме побудові узагальненої теорії їх зчеплення в рамках загальної теорії залізобетону.

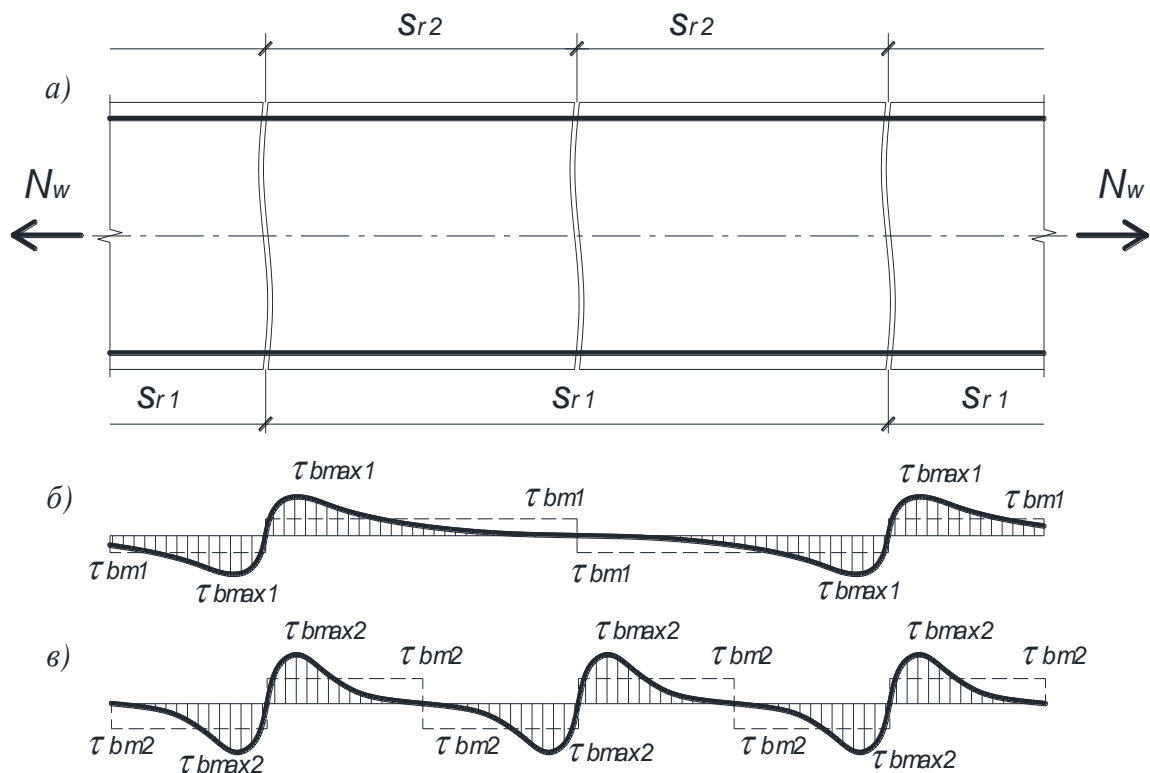


Рис. 3. Схема (а) та епюри напружень зчеплення за першого (б) і другого (в) рівнів утворення тріщин в центрально-розтягнутому залізобетонному елементі

Список використаних джерел

1. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Чинний від 01.06.11. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.
2. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, Dec. 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p.
3. Бабич Є. М., Вавринюк Б. А., Чапюк О. С. Напружено-деформований стан контакту з бетоном арматури серповидного профілю. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди: зб. наук. праць*. Рівне, 2009. Вип. 19. С. 74-82.
4. Колчунов В. И., Яковенко И. А., Дмитренко Е. А. Конечно-элементное моделирование нелинейной плоской задачи сцепления бетона и арматуры в ПК Лира-САПР. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2016. № 3. С. 6-15.
5. Худик Ю. Т., Рыбалка Е. М., Климов Ю. А. Производство и применение арматурного проката класса А500С. *Будівельні конструкції: зб. наук. праць НДІБК*. Київ, 2003. Вип. 59, кн.1. С. 22-25.
6. Romashko O., Romashko V. Evaluation of bond between reinforcement and concrete. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 230. 02027. (SCOPUS).
7. Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин: *зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УДУЗТ, 2018. Вип. 181. С. 58-65.

8. Schießl A. Verbundverhalten von selbstverdichtendem Beton: Beitrage zum 38. Forschungskolloquium am 2 und 3. Marz 2000 an der Technische Universität München. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2000. S. 177-185.
9. Ikki N., Kiyomiya O. and Yamada M. Experimental study on the effects of numerous factors on bond-slip relationship. *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*. 1996, Vol. 33, No. 550. P. 73-83.
10. Balasz G. L. Connecting Reinforcement to Concrete by Bond. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2007. Vol. 102, No. S1. P. 46-50. (SCOPUS).
11. Lowes L. N., Moehle J. P. and Govindjee S. Concrete-Steel Bond Model for Use in Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures. *ACI Structural Journal*. 2004. V. 101, No. 4. P. 501-511. (SCOPUS).
12. Назаренко П. П. Контактное взаимодействие арматуры и бетона при кратковременном нагружении. Самара: СамГУПС, 2012. 171 с.
13. Кочкаръов Д. В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2018. 44 с.
14. Romashko V., Romashko O. The construction features of the deformation and force model of concrete and reinforced concrete resistance. *MATEC Web of Conf.* 2017. Vol. 116. 02028. (SCOPUS).
15. Romashko V., Romashko O. Calculation of the crack resistance of reinforced concrete elements with allowance for the levels of normal crack formation. *MATEC Web of Conf.* 2018. Vol. 230. 02028. (SCOPUS).
16. Цыба О. О. Трещиностойкость и деформативность растянутого бетона с ненапрягаемой и напрягаемой стержневой арматурой, имеющей различную относительную площадь смятия поперечных ребер: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 2011. 24 с.
17. Шамурадов Б. Ш. Ширина раскрытия нормальных трещин в железобетонных элементах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Киев, 1987. 19 с.
18. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.
19. Кольнер В. М. Сцепление арматуры с бетоном и прочность заделки стержневой арматуры периодического профиля. *Бетон и железобетон*. 1965. № 11. С. 25-27.
20. Adrouche K. Influence of the constitutive parameters for steel-concrete association on bond strength under slow cyclic loading. *Materials and Structures: RILEM*. 1987. Vol. 20. P. 315-320.
21. Rashedul Kabir Md. Bond stress behavior between concrete and steel rebar: Critical investigation of pull-out test via Finite Element Modeling. *International Journal of Civil and Structural Engineering*. 2014. Vol. 5, No1. P. 80-90.
22. Самошкин А. С., Тихомиров В. М. Исследование нелинейного деформирования железобетона экспериментально-расчетными методами. *Изв. вузов: стр-во*. 2017. Т. 5. С. 17-27.

Ромашко-Майструк Олена Василівна, старший викладач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID iD: 0000-0003-3353-2268. Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko-Maistruk Olena Vasylivna, Senior Lecturer of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). ORCID iD: 0000-0003-3353-2268. Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Статтю прийнято 15.04.2020 р.

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 332.2

ЕКОНОМІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВІДШКОДУВАННЯ ЗБИТКІВ, СПРИЧИНЕНИХ НЕПРОВЕДЕННЯМ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ

О. І. Качановський

ECONOMIC RATIONALE FOR RECOVERY OF DAMAGES CAUSED BY THE FAILURE TO RECULTIVATE LANDS

O. Kachanovskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.214166>

***Анотація.** Самовільне стихійне видобування буритину завдає серйозних економічних втрат державі та суспільству, це супроводжується погіршенням соціального клімату, призводить до деградації значних площ земель сільськогосподарського та лісгосподарського призначення, спричиняє порушення структури природних ландшафтів. Оскільки порушені біотопи не можуть відновитися у первісному стані природним шляхом, без втручання людини, вони потребують рекультивації.*

Законодавство, що регулює суспільні відносини у сфері рекультивації порушених земель, потребує внесення подальших змін, адже переважна більшість нормативно-правових актів вказує на здійснення рекультивації або відповідальність за її нездійснення особами, що проводять гірничодобувні, геологорозвідувальні, будівельні та інші роботи, що передбачають механічне пошкодження ґрунтового покриву.

Непроведення рекультивації порушених земель належить до правопорушень, що завдають збитків легальним власникам та користувачам земельних ділянок, територіальній громаді та державі. Порушник земельного законодавства, що не виконує комплексу організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, поліпшення стану та продуктивності порушених земель, відповідно до затвердженої документації із землеустрою, незаконно одержує дохід від використання на інші цілі коштів, які, згідно з кошторисом у затвердженому робочому проєкті землеустрою, мали б спрямовуватися на проведення рекультивації порушених земель.

Запровадження економіко-правового механізму відшкодування порушником збитків, що завдані внаслідок незаконного видобутку буритину, невиконанням робіт із рекультивації земель після завершення експлуатації родовищ корисних копалин, забезпечить більш ефективний захист інтересів держави і територіальних громад, прав власників та користувачів земельних ділянок, позитивно вплине на зменшення правопорушень у сфері землекористування.

Отже, рекультивація стає невід'ємною частиною охорони та раціонального використання природних ресурсів.

***Ключові слова:** незаконний видобуток буритину, порушені землі, рекультивація, непроведення рекультивації земель.*

Abstract. *Unauthorized uncontrolled mining of amber causes serious economic losses to the state and society. It is accompanied by a deterioration of the social climate, leads to the degradation of large areas of agricultural and forestry land, and it causes disturbance of the natural landscape structure. Since disturbed biotopes cannot be restored to their original state without human intervention, they need to be rehabilitated.*

Legislation that regulates social relations in the field of disturbed land reclamation requires further amendments. For the vast majority of regulations indicate that persons carrying out mining, exploration, construction and other works involving mechanical damage to the soil shall be liable for land reclamation or for the failure to undertake it.

Failure to reclaim disturbed land is the violation that causes damage to legal owners and users of land, the territorial community and the state. A violator of land legislation that does not implement a set of organizational, technical and biotechnological measures aimed at restoring soil cover, improving the condition and productivity of disturbed land in accordance with the approved land surveying documentation illegally receives income from the funds application for other purposes than the ones specified in the cost estimation of the land management project and should have been aimed at reclamation of disturbed land.

Introduction of economic and legal mechanism of compensation for damages caused by illegal amber mining, non-performance of land reclamation works after completion of mineral deposits shall provide more effective protection of the interests of the state and territorial communities, rights of land owners and users, shall have a beneficial impact in terms of the reduction of land use violations.

Thus, reclamation becomes an integral part of the protection and rational use of natural resources.

Keywords: *Illegal amber mining, disturbed land, reclamation, failure to reclaim land.*

Вступ. Держава в особі центральних та місцевих органів влади, як законодавчої, так і виконавчої, змушена докладати зусиль для вирішення зазначеної проблеми, однак помітних зрушень наразі не досягнуто. Порушені землі назавжди виводяться з господарського обігу, адже відновленням таких земель часто нехтують або ж заходи з рекультивациі проводяться в мінімальному обсязі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Над зазначеними проблемами працюють науковці, які прагнуть у своїх працях розкрити складність сучасного стану рекультивацийних робіт в Україні. Серед наукових робіт, що привертають увагу дослідників до проблем раціонального використання земель, еколого-економічних аспектів рекультивациі та вибору технологічних схем відновлення земельних угідь, належать наукові праці Д. С. Добряка [1], В. О. Мандрика [2, 3], А. Г. Мартина [4], Р. М. Панаса [5], Л. В. Моторіної [6], В. А. Овчинникова [7] та ін.

Під час досліджень було проаналізовано методику оперативного та широкомасштабного картографічного моніторингу видобутку корисних копалин та рекультивациі порушених земель за допомогою платформи Google Earth Engine та алгоритму LandTrendr. Ця методика запропонована вченими Університету Чжецзян та Китайського гірничотехнологічного університету, а також може бути використана для визначення календарної дати порушення земельного покриву [8].

Проблему використання даних дистанційного зондування для виявлення місць незаконного видобування бурштину висвітлено у наукових працях В. Є. Філіповича [9], С. С. Ковалевського [10].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є оцінка впливу незаконної діяльності використання надр на екологічний стан території Рівненської області та економічна оцінка розміру шкоди, заподіяної незаконним видобуванням цінного каменю.

Для досягнення мети необхідно визначити економічні передумови відшкодування збитків, спричинених непроведенням рекультивації земель внаслідок видобування бурштину.

Основна частина дослідження. Реалізація проєктів рекультивації широко застосовується в провідних країнах світу. Так, США є однією з передових країн щодо законодавчого забезпечення вирішення та врегулювання правовідносин у сфері рекультивації земель. Рекультивацією земель у США займається федеральне агентство OSMRE [11], служба охорони ґрунтів, лісова та геологічна служба та інші відомства штатів. Відповідно до Закону «Про відтворення порушених земель гірничими роботами» («Surface Mining Control and Reclamation, 1977») запроваджено програми щодо регулювання активних шахт та рекультивації земель покинутих шахт [12]. Для здійснення законодавчого забезпечення рекультивації земель у США було прийнято Програму відтворення земель, яка запроваджується через так звану аварійну, невідкладну програму (Emergency Program) для реалізації нагальних проблем, що мали високу ймовірність загрози здоров'ю, безпеці або загальному добробуту населення, тоді, коли загрози не можна було усунути [3].

Підприємство, діяльність якого пов'язана з порушенням земель, при отриманні ліцензії на проведення видобутку корисних копалин має внести заставу за ділянку, яка згідно з проєктною діяльністю, підлягає порушенню [13]. При цьому якісний стан рекультивованої ділянки має зберігатися постійним упродовж декількох років. У разі невиконання цих вимог підприємство втрачає свою заставу і втрачає право на проведення видобувних робіт та отримання ліцензій на інший видобуток корисних копалин.

У Великобританії промислові розробки займають значний відсоток площ порівняно з її територією. Відповідно до цих обставин сформовано законодавство для

регулювання питання рекультивації. Регулювання робіт з відновлення родючості земельного фонду здійснює (MAFF) Міністерство сільського господарства через департаменти сільськогосподарського відновлення земель. Підприємства, які займаються розробками, змушені сплачувати кошти, які накопичуються, пропорційно обсягам видобутої сировини. Тобто сплачуються кошти за техногенний вплив на навколишнє середовище, це є компенсація за збиток, який завдано земній поверхні – за тону видобутої копалини [13].

В Україні питання рекультивації земель є одним із основних завдань правової охорони земель, оскільки чинне законодавство не забезпечує їх належної охорони.

Одним з напрямів втручання у ситуацію з боку державних органів та громадськості є діяльність з практичної реалізації реабілітації порушених ділянок. З цією метою Кабінет Міністрів України ухвалив постанову від 30.11.2016 № 1063 [14], якою затверджено «Порядок реалізації пілотного проєкту рекультивації земель лісогосподарського призначення, порушених внаслідок незаконного видобування бурштину». На виконання цієї постанови прийнято низку супровідних документів, зокрема «Перелік земель лісогосподарського призначення, у межах яких є частини, які порушені внаслідок незаконного видобування бурштину і потребують рекультивації», затверджений наказом Держлісагентства України від 21.04.2017 № 138 [15]. Усього цей перелік включає 2046 порушених ділянок; площа порушених земель внаслідок незаконного видобування бурштину становить 30037,6 га; сумарна площа лісових виділів у межах цих кварталів, на яких є порушені площі, – 9816,9 га; сумарна площа власне порушених угідь – 4385,45 га.

Виконавці з метою виконання умов договорів мають право залучати до проведення робіт з рекультивації земель лісогосподарського призначення, порушених внаслідок незаконного видобування

бурштину, суб'єктів господарювання, зокрема тих, засновниками яких є територіальні громади, та фізичних осіб [10].

Відповідно до статті 166 Земельного кодексу України від 25.10.2001 № 2768-III [16], рекультивация порушених земель – це комплекс організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, поліпшення стану та продуктивності порушених земель. Рекультивация здійснюється шляхом пошарового нанесення на малопродуктивні земельні ділянки або ділянки без ґрунтового покриву знятої ґрунтової маси, а в разі потреби – і материнської породи в порядку, який забезпечує найбільшу продуктивність рекультивованих земель [17].

Шляхи рекультивации, залежно від природно-господарських особливостей території та інших чинників, можуть бути різними. Проте, обираючи напрям рекультивации порушених територій, необхідно враховувати комплекс економічних, екологічних та соціальних вимог, що у підсумку сприятиме раціональному перерозподілу територій між різними видами господарського використання.

Статтею 1 Закону України «Про державний контроль за використанням та охороною земель» від 19.06.2003 № 963-IV [18] визначено, що непроведення рекультивации порушених земель – це невиконання комплексу організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, поліпшення стану та продуктивності порушених земель відповідно до затвердженої документації із землеустрою.

Згідно зі статтею 54 Кодексу України про адміністративні правопорушення від 07.12.1984 № 8073-X [19], непроведення рекультивации порушених земель тягне за собою накладення штрафу на громадян від п'яти до десяти неоподатковуваних мінімумів доходів громадян і на посадових осіб – від десяти до тридцяти неоподатковуваних мінімумів доходів громадян.

Водночас, згідно зі статтею 56 Закону України «Про охорону земель» від 19.06.2003 № 962-IV [17], юридичні і фізичні особи, винні в порушенні законодавства України про охорону земель, несуть відповідальність згідно із законом, а застосування заходів дисциплінарної, цивільно-правової, адміністративної або кримінальної відповідальності не звільняє винних від відшкодування шкоди, заподіяної земельним ресурсам. А сама шкода, заподіяна внаслідок порушення законодавства України про охорону земель, підлягає відшкодуванню в повному обсязі.

Алгоритм визначення розміру збитків, завданих невиконанням робіт із рекультивации земель, є таким:

1) визначення приведеної кошторисної вартості комплексу організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, поліпшення стану та продуктивності порушених земель, на дату проведення перевірки під час здійснення державного контролю за використанням та охороною земель шляхом множення її на індекс цін на будівельно-монтажні роботи у добувній промисловості, який характеризує зміни у часі вартості будівельно-монтажних робіт із рекультивации земель, порівняно з періодом, на який розроблявся робочий проєкт землеустрою;

2) визначення середньорічного доходу порушника від непроведення рекультивации порушених земель шляхом множення приведеної кошторисної вартості комплексу організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, поліпшення стану та продуктивності порушених земель, на облікову ставку Національного банку України;

3) визначення загального розміру завданих непроведенням рекультивации порушених земель збитків шляхом множення середньорічного доходу порушника від непроведення рекультивации порушених земель на строк непроведення рекультивации порушених земель [4].

Таким чином, загальна формула визначення розміру збитків, завданих невиконанням робіт із рекультивації земель, буде мати вигляд:

$$Зр = BK \times I \times \frac{C}{100} \times \frac{T}{12},$$

де $Зр$ – розмір збитків, грн; BK – кошторисна вартість комплексу організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, поліпшення стану та продуктивності порушених земель, відповідно до затвердженої документації із землеустрою, грн; I – добуток помісячних індексів цін на будівельно-монтажні роботи за даними Держкомстату України за термін непроведення рекультивації порушених земель; C – облікова ставка Національного банку України на дату визначення розміру збитків, %; T – строк непроведення рекультивації порушених земель, міс.

У разі повторного невиконання робіт із рекультивації земель після завершення експлуатації родовища корисних копалин, із розміру збитків, визначених за запропонованою формулою, має бути вилучена сума раніше відшкодованих збитків, оскільки подвійного покарання за одне й те саме правопорушення не допускається [4].

Для з'ясування масштабів нелегального видобутку бурштину, визначення площ, що потребують заходів рекультивації і відтворення екологічного стану, необхідно розробити методику ідентифікації, провести докладну інвентаризацію порушених територій, оперативно оцінити збитки, що зазнає держава.

Для розрахунку збитків досліджено покинутий кар'єр поблизу с. Новаки Володимирецького району Рівненської області (див. рисунок), який утворився внаслідок самовільного видобування цінного каменю.



Рис. Територія масиву незаконного видобутку бурштину с. Новаки Володимирецького району Рівненської області

За результатами проведеної інвентаризації визначено площу порушених земель внаслідок нелегального видобутку бурштину (табл. 1), встановлено наявні ознаки негативного антропогенного впливу, які пов'язані з самовільним використанням надр, а саме: самовільно знятий родючий шару ґрунту, порушено цілісну структуру ґрунтового покриву, гідрологічного

режиму, геологічну структуру території надр, знищено рослинність.

Приклад розрахунку збитків, завданих невиконанням робіт із рекультивації земель після завершення експлуатації родовищ видобутку бурштину (масив площею 36,5583 га поблизу с. Новаки Володимирецького району Рівненської області, див. рисунок), наведено у табл. 2.

Таблиця 1

Характеристика відновлювальної поверхні кар'єру

Категорія земель/форма власності	Площа порушених земель, га	Шифр агровиробничої групи ґрунтів	Площа агровиробничої групи ґрунтів, га
Землі сільськогосподарського призначення	36,5583	8б	8,234
		142а	19,53
		179б	7,03
		153	1,76
З них			
Державна власність	24,2164		
Приватна власність	12,3419		

Таблиця 2

Розрахунок збитків внаслідок непроведення рекультивації порушених земель

Показник	Одиниця виміру	Позначення показника	Джерело одержання показника	Значення показника
1	2	3	4	5
1. Кошторисна вартість комплексу організаційних, технічних і біотехнологічних заходів, спрямованих на відновлення ґрунтового покриву, поліпшення стану та продуктивності порушених земель, відповідно до затвердженої документації із землеустрою	гривень	ВК	Зведений кошторис робочого проекту землеустрою щодо рекультивації порушених земель	2496930
2. Термін завершення проектного строку реалізації документації із землеустрою щодо рекультивації порушених земель	дата	Др	Календарний план робочого проекту землеустрою щодо рекультивації порушених земель	01 травня 2023 року

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5
3. Термін виявлення непроведення рекультивації порушених земель	дата	Дн	Акт перевірки дотримання вимог земельного законодавства	01 грудня 2018 року
4. Строк непроведення рекультивації порушених земель	місяців	Т	Дн – Др	53
5. Добуток помісячних індексів цін на будівельно-монтажні роботи за термін непроведення рекультивації порушених земель	-	І	Дані Держкомстату України	2,751
6. Облікова ставка Національного банку України	відсотків	С	Дані Національного банку України	18,0
7. Розмір збитків, завданих невиконанням робіт із рекультивації земель після завершення експлуатації родовища корисних копалин	гривень	Зр	$Zp = BK \times I \times (C / 100) \times (T / 12)$	5460898,28

Таким чином, економічним виразом збитків, що завдані невиконанням робіт із рекультивації порушених земель власнику земельної ділянки або землекористувачу, є упущена вигода, яка, відповідно до ст. 22 Цивільного кодексу України від 16.01.2003 № 435-IV [20], не може бути менше (прирівнюється до) доходу, одержаного правопорушником.

Висновки. Ефективне запобігання правопорушенням, пов'язаним із непроведенням рекультивації земель, у перспективі може також здійснюватися

шляхом введення обов'язкового страхування цивільної відповідальності осіб, що здійснюють гірничодобувні, геологорозвідувальні, будівельні та інші роботи, які призводять до порушення земель.

Запропонований методичний підхід може бути використаний при розробленні проєкту постанови Кабінету Міністрів України про методику визначення розміру збитків, завданих невиконанням робіт із рекультивації земель після завершення експлуатації родовищ корисних копалин.

Список використаних джерел

1. Добряк Д. С., Тихонов А. Г., Гребенюк Н. В. Теоретичні засади сталого розвитку землекористування у сільському господарстві. Київ: Урожай 2004. 136 с.
2. Мандрик В. О. Еколого-економічні проблеми відтворення порушених земель у контексті вимог екологічної політики. *Науковий вісник: Екологізація економіки як інструмент сталого розвитку в умовах конкурентного середовища*. 2005. Вип. 15.6. С. 482–488.
3. Мандрик В. О. Відтворення порушених земель: зарубіжний досвід, механізм фінансування. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2005. Вип. 5.3. С. 208–212.
4. Мартин А. Визначення збитків унаслідок непроведення рекультивації земель. *Землевпорядний вісник*. 2008. № 4. С. 46–50.

5. Панас Р. М. Рациональное використання та охорона земель: навч. посіб. Львів: Новий світ-2000, 2008. 352 с.
6. Моторина Л. В. Промышленность и рекультивация земель. Москва. 1975. 240 с.
7. Моторина Л. В., Овчинников В. А. Рекомендации по рекультивации земель, нарушенных открытыми горными работами. Москва. 1975. 240 с.
8. MDPI and ACS Style. Xiao, W.; Deng, X.; He, T.; Chen, W. Mapping Annual Land Disturbance and Reclamation in a Surface Coal Mining Region Using Google Earth Engine and the LandTrendr Algorithm: A Case Study of the Shengli Coalfield in Inner Mongolia, China. *Remote Sens.* 2020, 12, 1612.
9. Філіпович В. Є. Оперативний контроль поширення нелегального видобутку бурштину та оцінка збитків, заподіяних державі, за матеріалами багатозональної космічної зйомки. *Екологічна безпека та природокористування.* 2015. Вип. 20 (4). С. 71–78.
10. Ковалевський С. С. Виявлення осередків добування бурштинових копалин на території лісових масивів України. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2019. Т 29. № 6. С. 40–44.
11. The Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement (OSMRE). URL: <https://www.osmre.gov/>.
12. Surface Mining Control and Reclamation Act of 1977. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_Mining_Control_and_Reclamation_Act_of_1977.
13. Швець О. Г., Дребот О. І. Напрями підвищення ефективності використання агресурсного потенціалу в регіонах техногенно порушених земель з врахуванням світового досвіду. *Інвестиції: практика та досвід.* № 18/2015. С. 54–58.
14. Про затвердження Порядку реалізації пілотного проєкту рекультивації земель лісгосподарського призначення, порушених внаслідок незаконного видобування бурштину: Постанова Кабінету Міністрів України від 30 листопада 2016 № 1063. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1063-2016-%D0%BF>.
15. Перелік земель лісгосподарського призначення, у межах яких є частини, які порушені внаслідок незаконного видобування бурштину і потребують рекультивації: Наказ Держлісагентства 21.04.2017 № 138. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0138820-17/conv>.
16. Земельний кодекс України: Закон України від 25.10.2001 р. № 2768-III. *Відомості Верховної Ради України.* 2002. № 3-4. Ст. 27. Дата оновлення: 13.02.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14>.
17. Про охорону земель: Закон України від 19.06.2003р. № 962-IV. Дата оновлення: 18.12.2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15>.
18. Про державний контроль за використанням та охороною земель: Закон України від 19.06.2003 р. №963-IV. Дата оновлення: 28.12.2015. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/963-15>.
19. Кодекс України про адміністративні правопорушення: Постанова Верховної Ради Української РСР від 07.12.84 р. № 8074-10. *Відомості Верховної Ради Української РСР.* 1984. Додаток до № 51. Ст. 1122. Дата оновлення: 19.01.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80731-10>.
20. Цивільний кодекс України: Закон України від 16.01.2003 р. № 435-IV. *Відомості Верховної Ради України.* 2003. №№ 40–44. Ст. 356. Дата оновлення: 16.01.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15>.

Качановський Олег Ігорович, заступник директора ВСП «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України». Тел. (0362) 265923. E-mail: myzvk2014@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-2322-8089.

Kachanovskiy Oleh Ihorovych, Deputy Director Rivne College of National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Tel. (0362) 265923. E-mail: myzvk2014@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-2322-8089.

Статтю прийнято 20.04.2020 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 656.052: 656.08

ДО ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ У ПАСАЖИРСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, кандидати техн. наук А. В. Труфанова, А. О. Бабенко, В. О. Шовкун

ANALYSIS OF DIRECTIONS FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF PASSENGER ROLLING STOCK

D. Sc. (Tech.) I. E. Martynov, PhD (Tech.) A. V. Trufanova, PhD (Tech.) A. O. Babenko, PhD (Tech.) V. O. Shovkun

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.214169>

***Анотація.** У роботі розглянуто основні чинники, які впливають на стан безпеки руху у пасажирському господарстві АТ «Укрзалізниця». Проведено аналіз розподілу парку пасажирських вагонів за віком та, враховуючи коливання пасажирообігу, визначено середньорічну потребу у придбанні нових вагонів.*

Доведено, що стан спрацювання пасажирських вагонів досяг критичної позначки. У зв'язку з обмеженням фінансування в «Укрзалізниці» на придбання нового рухомого складу в потрібній кількості та вилученням вагонів, термін служби яких вичерпано, кількість вагонного парку неухильно зменшується. Це може призвести до проблем із забезпеченням наявним рухомим складом пасажирських перевезень.

У результаті дослідження отримано залежності зміни кількості транспортних подій, віднесених на пасажирське господарство. Доведено, що питома кількість транспортних подій, що припадає на 100 тис. перевезених пасажирів, незважаючи на коливання кількості рухомого складу та пасажирообігу, останніми роками має тенденцію до збільшення. Отримано залежності зміни параметра потоку відмов пасажирських вагонів у розрахунку на 1 млн пас. км.

Проведено аналіз причин, які викликають транспортні події, та досліджено динаміку їх зміни. Визначено, що переважна більшість відмов пасажирських вагонів спричинена відмовами роликів букс та автоматичних гальм. Ще однією важливою причиною є саморозчеплення автозчепів. Особливу увагу приділено відмовам колісних пар. Досліджено основні причини, що викликають позапланові заміни колісних пар. Визначено напрямки основних заходів щодо підвищення безпеки руху у пасажирському господарстві АТ «Укрзалізниця».

Ключові слова: пасажирський вагон, статистика порушень, відмова, безпека руху.

***Abstract.** The main factors influencing the state of traffic safety in the passenger economy are considered in the work. It is determined that the state of operation of passenger cars has reached a critical level. The number of car fleets is also steadily declining. For the period 2018-2019, the passenger's turnover performed by railway is approximately 36% of the total passenger's turnover of all kinds of transport, including public transport. To meet the need for passenger traffic, the wagon park must be systematically updated. The number of car fleets is also steadily declining. In the future, the situation with passenger traffic may become critical due to the shortage of cars. Due to the limited*

purchase of new passenger cars in the required quantity to prevent the reduction of the inventory, the directions for extending the standard service life of cars are stipulated. The dependences of the change in the number of transport events attributed to the passenger economy are obtained. It is proved that in recent years the specific number of traffic accidents per 100 thousand transported passengers, remains virtually unchanged, despite fluctuations in the number of rolling stock and passenger.

The analysis of the reasons causing transport events is carried out and dynamics of their change is investigated. It is determined that the main reasons for the failure of the elements of passenger cars are axle boxes with rolling bearings and automatic brakes. With the general decrease in the number of wagons sent to the voyage, the number of wheelsets changed proportionally did not decrease, and the ratio of the number of unscheduled wheelsets to wagons sent on the contrary increased.

It is established that the main reason for replacement is the formation of thermal meshes cracks on the rolling surface of the wheels. Organizational and technical measures to increase the reliability of passenger cars are proposed.

Keywords: *passenger car, statistics of violations, refusal, traffic safety.*

Вступ. Залізничний транспорт являє собою складну систему «людина – машина», у якій органічно поєднуються різноманітні технічні засоби різного функціонального спрямування та управлінські дії обслуговуючого персоналу. Саме злагодженість усіх ланок зазначеної системи забезпечує процес перевезень.

Головною умовою нормального та ефективного функціонування залізничного транспорту є забезпечення безпеки руху. Це питання завжди було в центрі уваги фахівців усіх рівнів при будівництві та реконструкції залізничних колій, створенні перспективних конструкцій рухомого складу, розробленні технологічних процесів ремонту та технічного обслуговування вагонів тощо. Разом з тим підвищення швидкостей руху та навантажень на вісь, упровадження інноваційних вагонів нового покоління (як вантажних, так і пасажирських) потребують нових підходів фахівців цієї галузі до забезпечення процесу керування безпекою руху поїздів.

Важлива роль у забезпеченні безпеки руху належить пасажирському господарству. З огляду на масовість парку пасажирських вагонів, будь-яка відмова елемента конструкції вагона на шляху прямування може стати причиною аварії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Безпека руху завжди була

пріоритетним напрямком у діяльності залізниць з моменту їх виникнення. Методи вирішення завдань забезпечення безпеки руху змінювались разом із змінами вимог до рівня безпеки. Так, на початковому етапі [1] використовувався так званий принцип «абсолютної безпеки». Стосовно рухомого складу це означало забезпечення відсутності відмов вагонів шляхом підвищення міцності елементів конструкції. Вважалося, що збільшена міцність підвищить надійність конструкції вагона [2]. Крім того, розрахунок на міцність проводився лише у детерміністичній постановці, не враховувалося стохастичного характеру дії багатьох навантажень.

У роботі [3] започатковано застосування статистичного підходу до вирішення проблеми безпеки руху.

У дослідженнях професора В. М. Самсонкіна [4] запропоновано використовувати так званий метод статистичної закономірності (МСЗ). Ця теорія побудована на статистичному підході до керування та являє собою ефективний підхід з точки зору теорії управління складними системами [5, 6].

У статті [7] проводиться аналіз випадків порушень безпеки руху у вагонному господарстві Укрзалізниці. Автори доходять висновку, що головною причиною відчеплень вагонів та затримок

вантажних поїздів на шляху прямування є недостатня надійність букс з підшипниками кочення.

У дослідженні [8] автори намагаються визначити напрямки шляхів підвищення ефективності пасажирських перевезень в умовах зносу пасажирського рухомого складу.

Особливу увагу фахівці приділяли умовам забезпечення відсутності можливості сходу вагонного колеса з рейки. Так, Г. Марье у своєму дослідженні [10] охоплює всі можливі умови руху залізничного рухомого складу по рейковій колії. При цьому сумісно розглядаються особливості конструкції як рухомого складу, так і колії. Особливо докладно досліджується питання дії інерційних та динамічних сил, що виникають при великих швидкостях руху.

У статті [12] авторами розглянуто питання забезпечення ресурсами для якісного та своєчасного технічного обслуговування рухомого складу. Мета роботи полягає в тому, щоб підвищити доступність і надійність при одночасному зниженні ризику відмови рухомого складу та, відповідно, підвищенні безпеки руху.

У дослідженні [13] розглянуто передові системи управління ремонтом та експлуатацією вагонів, які використовуються в Європейському Союзі. Авторами представлені основні технологічні і організаційні питання, які пов'язані з обслуговуванням і управлінням пасажирських вагонів, включаючи основні вимоги до апаратного і програмного забезпечення для реалізації системи (обслуговування, відстежування, система безпеки та ін.).

По мірі розвитку технологій залізничних систем виникає теоретично складна і практично значуща проблема необхідності використання системи автоматичного керування рухом поїздів для підвищення ефективності існуючої залізничної мережі з більш високою пропускною спроможністю, нижчими витратами і поліпшеною якістю

обслуговування за рахунок оптимізованого управління залізничним рухом і роботи потягів за умови забезпечення підвищеної надійності рухомого складу. В роботі [14] автори зосередилися на цій новій технології автоматичної роботи потягів (АКРП) для її теоретичного розвитку і практичних реалізацій. У роботі представлені дослідження про сучасні технології і АКРП на залізницях світу, яка містить докладний опис її розробки і впровадження існуючих систем.

Разом із цим очевидно, що у науковій літературі недостатньо проаналізовано причини відмов пасажирських вагонів, відомості про найбільш характерні пошкодження та їх зв'язок з рівнем технічного стану.

Визначення мети та завдання дослідження. Проаналізувати технічний стан пасажирського вагонного парку АТ «Укрзалізниця», встановити основні причини недостатньої надійності пасажирського рухомого складу та визначити напрямки основних заходів щодо підвищення безпеки руху у пасажирському господарстві АТ «Укрзалізниця».

Основна частина дослідження. Впродовж 2017 року вітчизняними залізницями у далекому та приміському сполученні було перевезено 206,63 млн пасажирів. У 2018-2019 рр. ця цифра була меншою і склала 202,84 млн та 201,19 млн пасажирів відповідно. За цей самий період пасажирообіг, виконаний залізничним транспортом, складає приблизно 36 % від загального пасажирообігу всіх видів транспорту, включно з міським транспортом. Для забезпечення потреби у пасажирських перевезеннях парк вагонів має систематично оновлюватись.

Як стверджується у [15], у 1990 році інвентарний парк пасажирських вагонів складав близько 9800 вагонів. Далі чисельність вагонного парку неухильно зменшувалась. Станом на 2006 рік інвентарний парк пасажирських вагонів Укрзалізниці всіх типів налічував 7704 од., 33 % (2545 вагонів) відпрацювали

встановлений ресурс (28 років) і їх треба було вилучити з експлуатації як такі, що не можуть забезпечити безпеки руху. Проте, при середньорічній потребі у придбанні 250 нових вагонів, за останній період 1990-2006 рр. залізницями України за власні кошти придбано лише 226 пасажирських вагонів або приблизно 7 % від загальної потреби.

Станом на 2008 рік вже 2890 вагонів відпрацювали свій ресурс. Середній рік пасажирського вагона склав 26,3 року, що відповідало 93 % зношеності.

У 2008 році Кабінет Міністрів України та Укрзалізниця прийняли «Комплексну програму оновлення залізничного рухомого складу України на 2008–2020 рр.». Згідно з цією програмою потреба у нових пасажирських вагонах складала понад 4500 одиниць на суму 23 млрд 803 млн грн. Програмою було передбачено конкретні заходи та розроблено плани щодо як закупівлі нових вагонів, так і проведення капітально-відновлювальних ремонтів (КВР) та капітальних ремонтів з подовженням терміну служби (КРП). Але через хронічну нестачу фінансування цих планів не було виконано.

У попередньому десятиріччі спостерігалася тенденція до зростання перевезень пасажирів у міжнародному і міждержавному сполученнях, а у внутрішньому та приміському сполученнях, порівняно з 2006 роком, обсяги перевезень знижувались. Це пояснюється розгалуженістю в Україні автомобільних перевезень на міжміському та приміському сполученнях.

У подальшому ситуація лише погіршувалася. У 2017 році інвентарний парк пасажирських вагонів основних перевезень перевищував 5000 од. (розподіл за роками побудови подано на рис. 1).

Очевидно, що переважну більшість вагонів збудовано у 70–80 роки ХХ століття. Вони зношені як фізично, так і морально. Середній вік пасажирського вагона складає 29,3 року.

Структуру інвентарного парку пасажирських вагонів за типами подано на рис. 2.

До кінця 2020 року вичерпається ресурс (28 років) обсягом 1001 од. Парк пасажирських вагонів за типами в межах терміну експлуатації на кінець року відображено в таблиці.

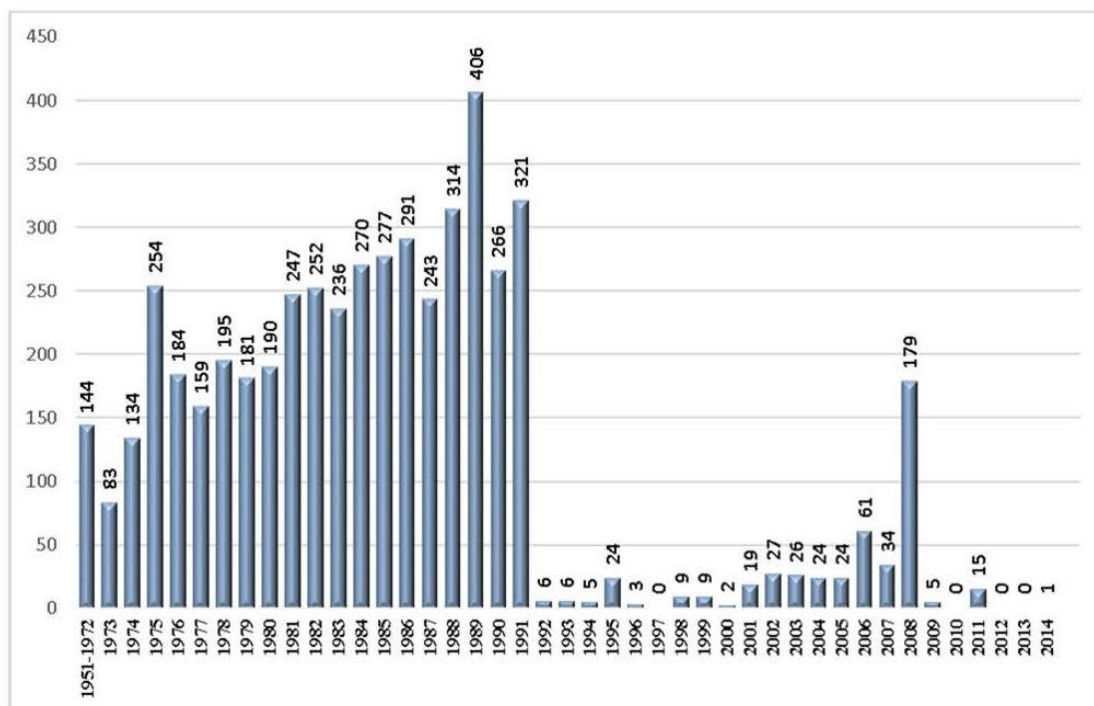


Рис. 1. Розподіл пасажирських вагонів за роками побудови

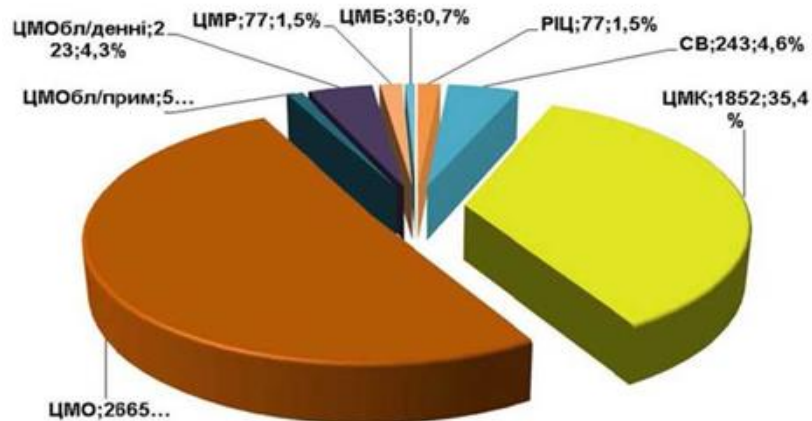


Рис. 2. Структура інвентарного парку пасажирських вагонів

Таблиця

Парк пасажирських вагонів у межах терміну експлуатації

Тип вагона	Рік та кількість вагонів				
	2015	2016	2017	2018	2019
Купейний/ЦМК	1888	1866	1694	1711	1608
Плацкартний/ЦМО	2690	2669	2302	2225	2108
Спальний/СВ	244	243	218	215	213
Спальний міжнародний/РІЦ	79	79	70	69	59
Міжобласний/МО	184	179	177	170	153
Вагон-ресторан/ЦМР	85	82	53	50	47
Багажний вагон/ЦМБ	35	35	37	37	32
Службово-технічний/СТ			10	10	5
Спеціальний рухомий склад та ін./СРС			19	19	19

Структуру інвентарного парку пасажирських вагонів за віком зображено на рис. 3.

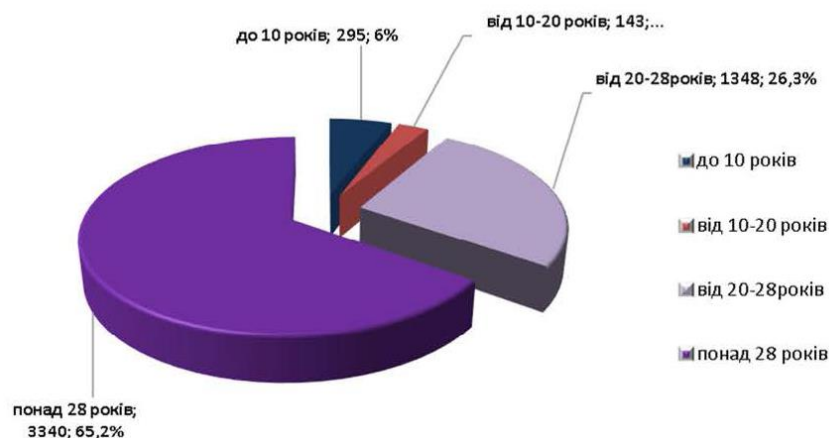


Рис. 3. Структура інвентарного парку пасажирських вагонів за віком

У подальшому ситуація з пасажирськими перевезеннями може набути критичного характеру через дефіцит вагонів. Через обмеженість придбання нових пасажирських вагонів у необхідній кількості, для запобігання скороченню інвентарного парку, обумовлено напрямки з продовження нормативного терміну служби вагонів. Це, зокрема, технічне обстеження вагонів, у яких закінчився встановлений виробником термін експлуатації. За результатами технічного обстеження визначається можливість продовження терміну експлуатації вагонів після виконання рекомендованого виду ремонту або необхідність вилучення вагонів із інвентарного парку. Основним напрямком відновлення працездатності парку пасажирських вагонів є капітально-відновлювальний ремонт. Під час виконання капітально-відновлювального ремонту обов'язковою є модернізація окремих систем, вузлів та деталей, яка спрямована на забезпечення

безпеки руху, покращення технічних властивостей пасажирського вагона та підвищення комфорту салонів.

Враховано також виконання капітально-відновлювального ремонту пасажирських вагонів з продовженням терміну експлуатації.

Та, крім технічного діагностування і КВР/КРП, треба одночасно проводити закупівлю нових вагонів, потреба в яких дедалі нарощуватиметься за рахунок необхідності вилучення із інвентарного парку вагонів, яким через технічний стан неможливо продовжити термін експлуатації за результатами технічного діагностування, а також вагони, термін експлуатації яких становить 41 рік та більше, незалежно від попередньо виконаного виду ремонту.

Безумовно, всі зазначені вище чинники впливають на рівень безпеки руху у пасажирських перевезеннях. Графік зміни кількості транспортних подій, віднесених на пасажирське господарство, зображено рис. 4.

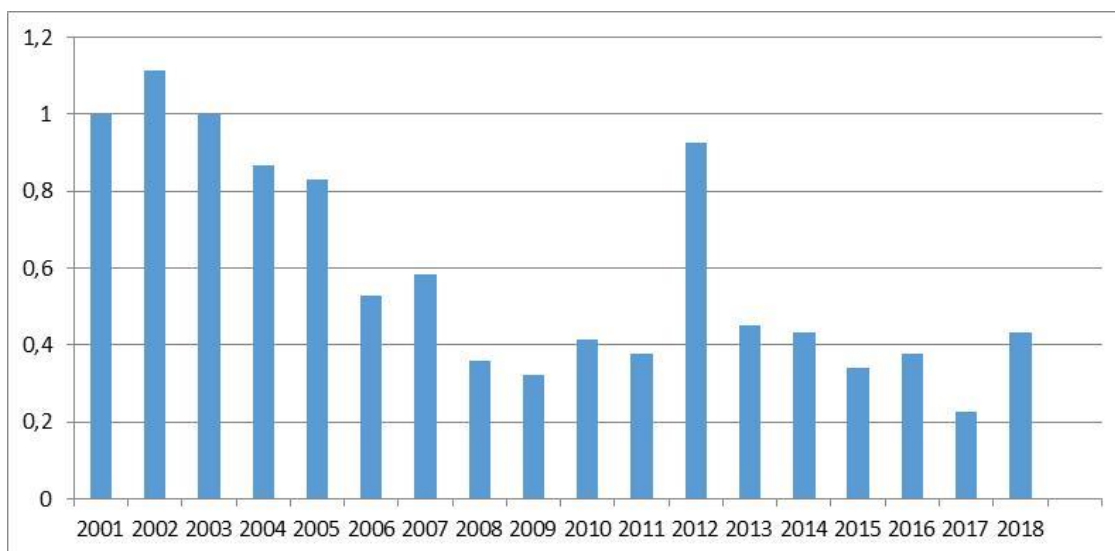


Рис. 4. Графік зміни кількості транспортних подій, віднесених на пасажирське господарство

Якщо починати відлік з 2001 року, то відповідна залежність буде мати такий вигляд:

$$\Delta(t) = -0,00007t^4 + 0,0022t^3 - 0,0187t^2 - 0,0398t + 1,1648, \quad (1)$$

де t – роки, що відлічуються після 2001 р.

Ступінь узгодженості отриманої теоретичної залежності з експериментальними даними перевірявся за допомогою

коефіцієнта кореляції R , який визначався за формулою [17]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_i - f_i(t)]^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)^2}, \quad (2)$$

де y_i – емпіричні дані;

$f_i(t)$ – дані, що отримані розрахунковим способом;

n – число пар даних.

Якщо починати відлік з 2001 року, то ситуація із забезпеченням безпеки руху здається досить благополучною. Абсолютна кількість транспортних подій неухильно зменшується.

На рис. 5 наведено залежність зміни параметра потоку відмов пасажирських вагонів за всіма видами відмов (у розрахунку на 1 млн пас. км) за період 2001–2018 рр., оскільки саме цей показник дає змогу узагальнити зміни, які відбулися за цей час на залізничному транспорті (зміни у пасажирообігу та зменшення кількості перевезених пасажирів, які відбулися за зазначені роки).

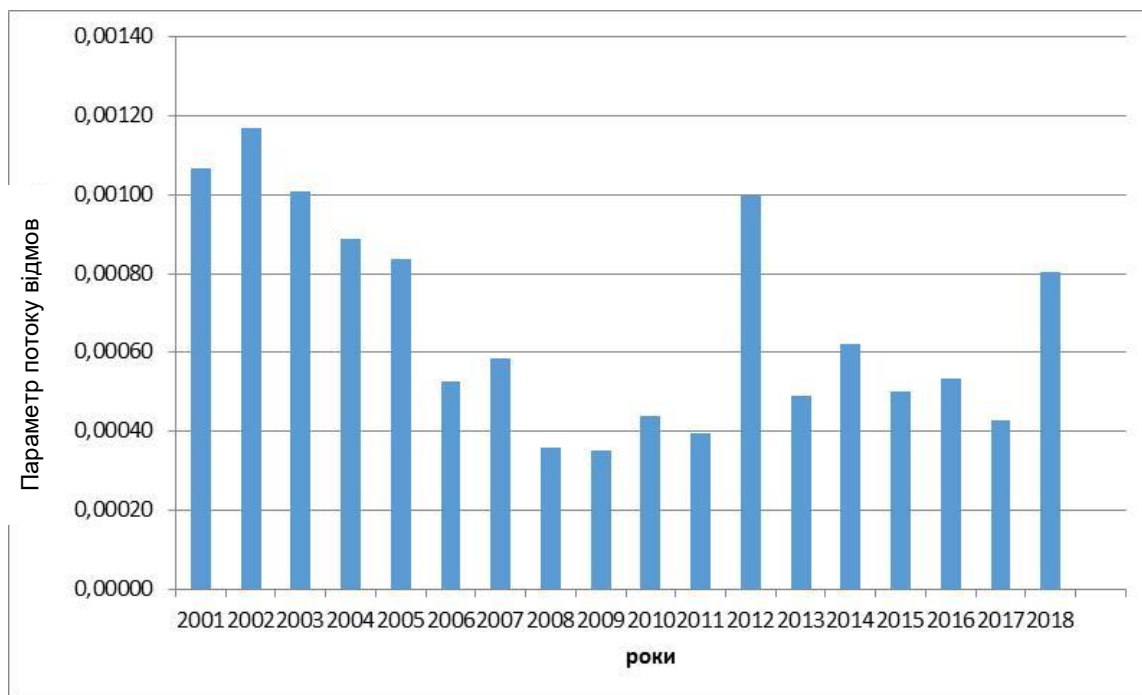


Рис. 5. Залежність зміни параметра потоку відмов пасажирських вагонів

Очевидно, що питома частка транспортних подій останніми роками має тенденцію до збільшення.

На рис. 6 наведено розподіл причин транспортних подій у пасажирському господарстві за 2017–2019 рр.

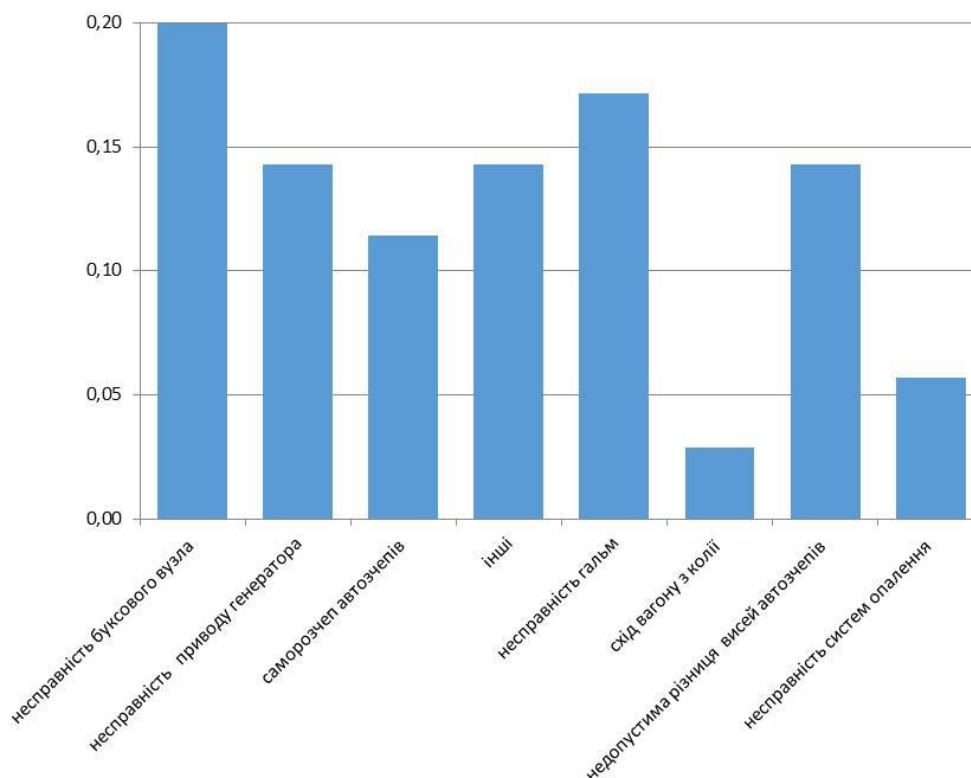


Рис. 6. Розподіл причин транспортних подій, віднесених на пасажирське господарство

Очевидно, що переважна більшість відмов пасажирських вагонів спричинена відмовами роликів букс та автоматичних гальм (разом 37 %). Ще однією причиною є саморозчеплення автозчепів.

Привертає увагу значна кількість колісних пар, що було позапланово замінено під час рейсу. За 2018–2019 рр. було замінено 4192 колісні пари. При загальному зменшенні кількості вагонів, відправлених у рейс, кількість замін колісних пар пропорційно не зменшилася, а співвідношення кількості позапланових замін колісних пар до вагонів, відправлених у рейс, навпаки, збільшилась. Також при поточному ремонті додатково за цей самий період позапланово було замінено 5494 колісні пари. Основні причини відмов колісних пар подано на рис. 7.

Зазначимо той факт, що переважна більшість відмов (87,35 %) пов'язана з ободом колеса. У свою чергу основними причинами виходу з ладу обода є вищербини (17,26 %), недопустима

мінімальна товщина гребеня (16,55 %) та сітка термічних тріщин (11,81 %).

Доведено, що вищербини виникають переважно при використанні композиційних гальмових колодок (77,43 % випадків). Причому лише у 7,71 % випадків на поверхні кочення колеса спочатку виникає повзун або навар, який вже потім розвивається у вищербину. У 62,03% випадків вищербина виникає без впливу додаткових чинників. Така сама ситуація характерна і для чавунних гальмових колодок.

Встановлено, що основною причиною заміни є утворення сітки термічних тріщин на поверхні кочення коліс. Це викликано неправильним регулюванням вертикальних важелів у візках (так званий «завал»), внаслідок чого уповільнювався відхід гальмових колодок від окремих колісних пар та припинялося відведення тепла від контактуючих поверхонь. Це призвело до розігрівання поверхневого шару обода колеса та утворення вказаної несправності.

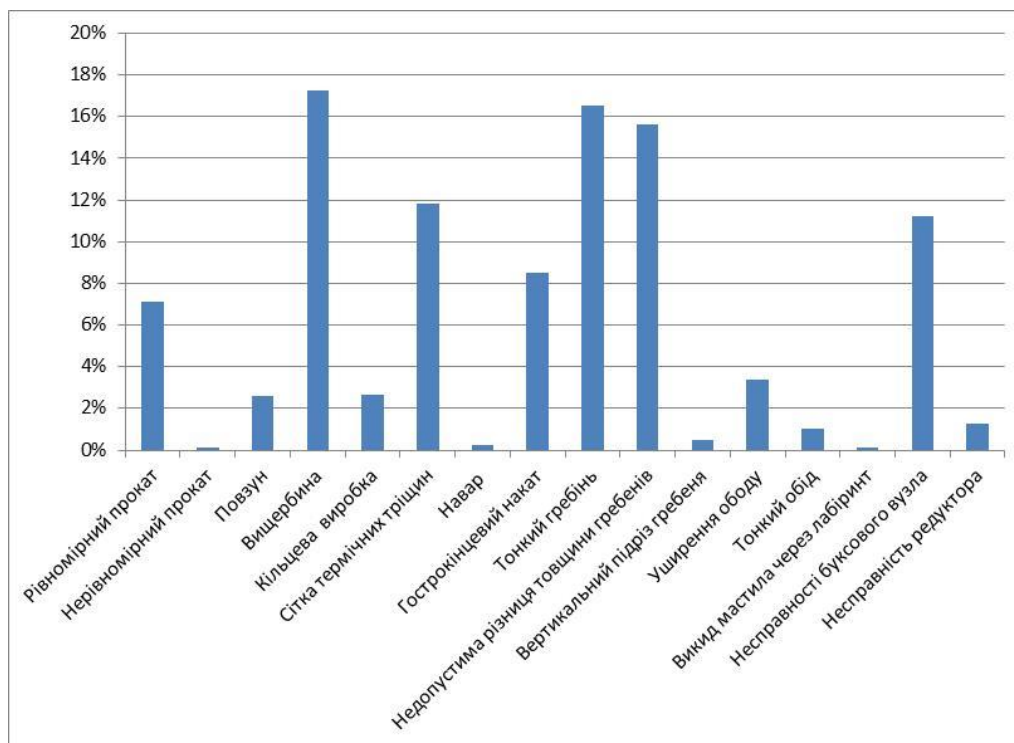


Рис. 7. Розподіл причин відмов колісних пар пасажирських вагонів

Іншими основними недоліками, які допускаються при підготовці та експлуатації пасажирських вагонів, є:

- відсутність шунтів заземлення «букса-візок» та «кузов-візок»;
- невідрегульовані фіксатори гальмових башмаків, зазори між гальмовою колодкою та поверхнею кочення колісної пари,
- відсутність мастила у місцях тертя шарнірних з'єднань гальмівної важільної передачі;
- клиноподібний знос гальмових колодок;
- послаблення кріплення гумових пакетів повідка візка;
- послаблення корончатої гайки повідка,
- витік рідини з гасників коливальних візка;
- розрив гумових накладок фанових труб;
- недоліки щодо утримання внутрішнього обладнання (дверей, замків, площадок, фіксаторів і облицювання).

Особливо необхідно звернути увагу на те, що майже всі зазначені пошкодження вузлів пасажирських вагонів пов'язані з низькою якістю ремонту і технічного обслуговування, недотриманням обслуговуючим персоналом вимог чинних технічних регламентів та інструкцій.

Висновки:

1. Аналіз технічного стану парку пасажирських вагонів залізниць України свідчить про його значне зношення. Переважна більшість пасажирських вагонів інвентарного парку відпрацювали встановлений ресурс і мають бути вилучені з експлуатації як такі, що не можуть забезпечити безпеки руху. Середній відсоток зносу пасажирського вагона складає 88 %.

2. Необхідно прискорити оновлення парку пасажирських вагонів шляхом закупівлі нових вагонів українського виробництва. Для цього залучати фінансування з усіх можливих джерел (у тому числі з приватних).

3. Через обмеженість придбання нових пасажирських вагонів у необхідній кількості, для запобігання скороченню інвентарного парку, обумовлено напрямки з продовження нормативного терміну служби вагонів. Це, зокрема, технічне обстеження вагонів, у яких закінчився встановлений виробником термін експлуатації.

4. Одним із основних напрямків забезпечення перевезення пасажирів є необхідність підтримки розмірів пасажирського парку вагонів за рахунок удосконалення технології технічного обслуговування та ремонту вагонів, що відпрацювали ресурс. Якість ремонту вагонів під час деповського та капітального

ремонтів має бути покращена. Особливо це стосується деталей, які підлягають зміцненню з продовженням терміну експлуатації.

5. Особлива увага при виконанні ремонтів має бути приділена забезпеченню надійної роботи ходових частин, у першу чергу колісних пар.

6. Необхідно вивести на новий рівень проведення систематичної профілактичної роботи в частині забезпечення безпеки руху шляхом проведення повторно-періодичних інструктажів, додаткових практичних і теоретичних технічних занять для технічного персоналу, пов'язаного з обслуговуванням та ремонтом вагонів.

Список використаних джерел

1. Лисенков В. М. Безопасность технических средств в системах управления движением поездов. Москва: Транспорт, 1992. 192 с.
2. Устич П. А., Карпычев В. А., Овечников М. Н. Надежность рельсового нетягового подвижного состава. Москва: УМЦ МПС России, 2004. 416 с.
3. Лисенков В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов: учебн. для вузов. Москва: ВИНТИ РАН, 1999. 332 с.
4. Самсонкин В. М. Теорія безпеки на залізничному транспорті: монографія. Київ: «Каравела», 2014. 248 с.
5. Самсонкин В. Н. Метод статистической закономерности в управлении безопасностью на железнодорожном транспорте. Донецк: ДонИИТ, 2005. 191 с.
6. Інформаційний аспект управління складними людино-машинними системами на основі закономірностей статистики їх поведінки / В. М. Самсонкін, В. А. Друзь, О. О. Самсонкін, О. С. Федорович. *Системи обробки інформації*. 2013. Вип. 6 (113). С. 121-127.
7. Пути повышения безопасности движения в вагонном хозяйстве / А. Ф. Гаврилюк и др. *Восточно-украинский журнал передовых технологий*. 2003. № 5. С. 30-32.
8. Ломотько Д. В., Воскобойников Д. Г., Сірадчук А. Д. Проблеми зниження експлуатаційних витрат в умовах зносу пасажирського рухомого складу. *Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції*. (Харків, 16 березня, 2017 р.). Харків: ХНАДУ, 2017. С. 150-154.
9. Куденко І. О. Шляхи вирішення проблеми надійності та безпечної роботи пасажирського парку в сучасних умовах: *зб. наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2003. Вип. 54. С. 68–72.
10. Марье Г. Взаимодействие пути и подвижного состава. Москва: Госжелдориздат, 1933. 338 с.
11. Nadal, M. J. Locomotives a Vapeur Collection Encyclopedie Scintifique Biblioteque de Mecanique Applique et Genie, Vol. 186, (Paris), 1988.

12. Al-Douri, Y.K., Tretten, P. & Karim, R. Improvement of railway performance: a study of Swedish railway infrastructure. *J. Mod. Transport.* 24, 22–37 (2016). URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0092-0/>
13. Athanasios Ballis, Loukas Dimitriou. Issues on railway wagon asset management using advanced information systems. *Ttransportation Research Part C: Emerging Technologies.* Vol. 18. Issue 5. P. 807-820 (October 2010). URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2009.09.003>.
14. Jiateng Yin, Tao Tang, Lixing Yang, Jing Xun, Yeran Huang, Ziyou Gao Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey. *Ttransportation Research Part C: Emerging Technologies.* Vol. 85. December 2017. P. 548-572. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.09.009>.
15. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки. Київ: ДП ДНДЦ УЗ, 2009. 299 с.
16. Аналіз стану безпеки руху у структурі публічного акціонерного товариства «Українська залізниця» у 2019 році». Розробники: О. І. Панасенко, С. Я. Ребриков, І. Г. Салівон. Департамент безпеки руху ПАТ «Українська залізниця». 2019.
17. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958. 464 с.

Мартинов Ігор Ернстович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-0481-3514.

Труфанова Альона Володимирівна, канд. техн. наук, доцент кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-1702-1054.

Бабенко Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри нарисної геометрії та комп'ютерної графіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-55. E-mail: babenko_spprm@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X.

Шовкун Вадим Олександрович, канд. техн. наук, старш. викл. кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vadimshovkun62@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-1826-6053.

Igor Martynov, D. Sc. (Tech.), Professor, Head of Department of Wagons, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-0481-3514.

Alena Trufanova, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Wagons, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-1702-1054.

Babenko Andrey, PhD (Tech), Associate Professor, Head of Department of Descriptive Geometry and Computer Graphics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-55. E-mail: babenko_spprm@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X.

Vadim Shovkun, PhD (Tech), Senior Lecturer, Department of Wagons, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: vadimshovkun62@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-1826-6053.

Статтю прийнято 29.05.2020 р.

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

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

Випуск 190

«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 15.10.2019 р. № 1301).

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

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

Редактори Буранова Н. В., Решетилова В. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 04.06.2020 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 5,0. Тираж 55. Замовлення № .

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