



**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 197*

**Харків 2021**

## **УДК 656.2(062)**

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

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

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

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

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

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

**Веб-сторінка збірника:** <http://znp.kart.edu.ua>

### **Реферативна база**

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

**ISSN (p) 1994-7852**

**ISSN (online) 2413-3795**

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р.  
Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 8 від 17 вересня 2021 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)  
Борзьяк 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-  
Universitet Weimar F.A., Німеччина)  
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

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

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

**Транспортні технології (275)**

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

**Геодезія та землеустрій (193)**

Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VGTU, Литва)  
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr.  
(VGTU, Литва)  
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська  
політехніка»)  
Церклевич А. Л., д.т.н. 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

### Будівництво та цивільна інженерія (192)

<i>Пиріг Я. І., Галкін А. В., Оксак С. В., Ільїн Я. В., Шийка Я. П.</i> Відновлення властивостей бітуму та асфальтобетону за допомогою омолоджувача	6
<i>Трикоз Л. В., Юрченко Р. В.</i> Систематизація дефектів залізобетонних мостів залізниць України за результатами їх обстеження	18
<i>Ромашко-Майструк О. В., Ромашко В. М.</i> Модель рівневого утворення та розкриття нормальних тріщин у розтягнутих залізобетонних елементах	28
<i>Тарасевич В. І., Гасан Ю. Г.</i> Корозійностійкий облицювальний матеріал з мінеральної в'язучої речовини і золи-виносу, модифікований розплавом сірки	36
<i>Плугін А. А., Калюжна О. В., Борзяк О. С., Плугін О. А., Савченко О. М.</i> Надшвидке отримання передаточної міцності бетону залізобетонних шпал за допомогою комплексних добавок	44

### Геодезія та землеустрій (193)

<i>Міхно П. Б., Шелковська І. М., Козарь В. І., Лашко С. П.</i> Сучасний стан забезпечення території полтавської області пунктами державної геодезичної мережі	64
<i>Лашко С. П., Шелковська І. М., Гальченко Н. П., Клюка О. М.</i> Картографічний аналіз поширення деградованих земель (на прикладі Полтавської області)	74

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

<i>Чишкала В. О., Литовченко С. В., Геворкян Е. С., Нерубацький В. П., Мазілін Б. О., Морозова О. М.</i> Опанування та модернізація фізико-хімічних процесів синтезу оксидних сполук зі структурою пірохлору	82
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### Залізничний транспорт (273)

<i>Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А., Хоружевський Г. А., Філіп'єва М. В.</i> Аналіз точних і апроксимуючих залежностей активного опору провідника від частоти струму під дією скін-ефекту	99
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### Транспортні технології (275)

<i>Новіков В. В., Бабенко А. О., Харківський О. С., Ткаченко О. О.</i> Визначення максимальної небезпечної ширини рейкової колії на залізобетонній основі зі скріпленнями типу КБ з урахуванням усіх факторів впливу	113
<i>Онищенко С. П., Мельник О. М., Волошин А. О., Калініченко Є. В., Заяц С. В.</i> Огляд основних механізмів управління енергоефективністю та контролю за викидами з морських суден	121
<i>Кравець А. Л., Чернолуцький А. В., Серпокрилов С. В.</i> Обґрунтування раціонального варіанта розвитку лінії швидкісного руху відповідно до техніко-технологічних та економічних критеріїв	129

### Теплоенергетика (144)

<i>Алексахін О. О., Дубинська І. С., Соляник І. С., Домбровська Ж. М.</i> Оцінка теплового стану мікрорайонної мережі опалення	136
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)**

---

УДК 665.775

**ВІДНОВЛЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІТУМУ ТА АСФАЛЬТОБЕТОНУ  
ЗА ДОПОМОГОЮ ОМОЛОДЖУВАЧА**

Кандидати техн. наук Я. І. Пиріг, А. В. Галкін, С. В. Оксак, Я. В. Ільїн,  
головний хімік НВП «Люкс» Я. П. Шийка

**RECOVERY OF THE BITUMEN AND ASPHALT CONCRETE PROPERTIES WITH  
REJUVENATOR**

PhD (Tech.) Y. Pyrig, PhD (Tech.) A. Galkin, PhD (Tech.) S. Oksak, PhD (Tech.) Y. Ilin,  
Y. Shyika

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248107>

---

***Анотація.** У статті розглянуто вплив на властивості бітуму та асфальтобетону вітчизняного омолоджувача Люкс «ЕД-Л». Встановлено, що під дією омолоджувача властивості зістареного за методом RTFOT бітуму повністю відновлюються до рівня бітуму до технологічного старіння. Значною перевагою омолоджувача Люкс «ЕД-Л» є значне покращення адгезійних властивостей бітуму. Обробка омолоджувачем зістарених за методикою AASHTO R 30-02 асфальтобетонних сумішей приводить до покращення показників якості асфальтобетонів, виготовлених з цих сумішей.*

***Ключові слова:** бітум, пенетрація, температура розм'якшеності, зчеплюваність, старіння, омолоджувач.*

***Abstract.** The main factor in the decreasing in the quality of asphalt concrete with time is the hardening of the bituminous binder, which occurs under the influence of high environmental temperatures, moisture and oxygen. Considering this, one of the ways to extend the service life of asphalt pavements is to implement procedures to prevent deterioration of the properties of bituminous binders, which occurs due to its hardening. To solve the problem of hardening, the use of various rejuvenators becomes widespread in road maintenance around the world. The aim of the research work is to analyze the effect of the domestic rejuvenator Lux «ED-L» on the properties of road bitumen and asphalt concrete made with this binder. The effect of the rejuvenator on the properties of bitumen is evaluated in three ways: finding the influence of Lux «ED-L» on the properties of the original bitumen; finding the ability to restore the properties of RTFOT-hardened bitumen by adding an additive to the hardened binder; finding the effect on the intensity of hardening by hardening of bitumen, which includes the Lux «ED-L» additive in its composition. In addition, according to this scheme, it is evaluating the effect of the rejuvenator on asphalt concrete mixtures, which are conditioned according to the method of AASHTO R 30-02. Based on the obtained experimental data, it is found that the modification of the RTFOT-hardened bitumen with Lux «ED-L» additive improves binder's properties, which results in the returning of the values of standard quality indicators (penetration, softening point and breaking point temperatures) to the initial level of values quality of bitumen before hardening. Lux «ED-L» additive significantly improves the adhesion properties of bitumen (both original and aged). Evaluation of the impact of the rejuvenator on the properties of asphalt mixtures after conditioning confirmed its effectiveness. The properties of asphalt concrete*

*made from mixtures after conditioning, which were treated with the Lux «ED-L» additive, according to obtained quality indicators is equal to the asphalt concrete with the original bitumen. A field test of the effect of the Lux «ED-L» additive on the properties of the asphalt pavement is in process. The results of field test will be obtained after 3 and 9 months of operation of the treated road section.*

**Keywords:** bitumen, penetration, softening point temperature, adhesion, resistance to hardening, rejuvenator.

**Вступ.** Асфальтобетон є найпоширенішим у світі матеріалом, що застосовується для влаштування покриттів автомобільних доріг. Поясненням цьому є значні переваги асфальтобетону перед іншими матеріалами: відносно висока міцність і несуча здатність; здатність до пружних і пластичних деформацій, значення яких визначаються та регулюються властивостями матеріалів і складом асфальтобетону; висока зчеплюваність автомобільних шин з поверхнею асфальтобетонного дорожнього покриття і його безшумність під час руху автомобілів; легкість влаштування асфальтобетонного покриття, а також його утримання та ремонту; можливість повторного використання асфальтобетону, що знімається під час капітального ремонту автомобільних доріг [1]. Асфальтобетону, як і будь-якому матеріалу, властиві й недоліки, до яких належать: значна залежність фізико-механічних властивостей від кліматичних умов (температури, опадів) району експлуатації дороги; зміна властивостей асфальтобетонного покриття з часом його експлуатації, що відбувається як за рахунок структурних змін (певного подрібнення зерен кам'яного матеріалу та доущільнення під дією руху автомобільного транспорту), так і через старіння в'язучого.

Головним фактором погіршення властивостей асфальтобетону є старіння бітумного в'язучого, що відбувається під дією високих експлуатаційних температур, вологи та кисню повітря. Виходячи з цього одним зі шляхів подовження терміну експлуатації асфальтобетонних покриттів є впровадження заходів запобігання зміні властивостей бітумних в'язучих, що відбувається через його старіння.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наприкінці 60-х років минулого століття в США для покращення якості асфальтобетонних покриттів було започатковано використання хімічних речовин, що отримали назву «омолоджувачі». При розподіленні цих речовин у вигляді водних емульсій по поверхні асфальтобетонного покриття внаслідок проникнення активної речовини на певну глибину відбувались пластифікація бітуму; герметизація поверхні покриття, що зменшувало проникнення вологи та повітря в асфальтобетон; підвищення довговічності верхньої частини асфальтобетонного покриття.

Rostler F. S. та White R. M. [2, 3] розробили теоретичні основи використання омолоджувачів. Займаючись дослідженням зміни якості нафтових бітумів через їх старіння, вони запропонували розподілення складових бітумів на асфальтени та мальтени, які у свою чергу поділяються на: полярні або азотні сполуки (N), що є компонентами високореактивних смол і діють як стабілізатори колоїдної системи, якою є бітум; перші ацидафіни (A<sub>1</sub>) – ароматичні смолисті вуглеводні, що є диспергентами або розчинниками пептизованих асфальтенів; другі ацидафіни (A<sub>2</sub>) – лінійні або циклічні ненасичені вуглеводні, які також є розчинниками пептизованих асфальтенів; насичені вуглеводні або парафіни (P) – компоненти вуглеводнів, що поєднують компоненти бітуму та діють на них як структуруючий агент. Автори роботи [2] розробили методику з розділення нафтового бітуму на вищенаведені компоненти і оцінили вплив тієї чи іншої складової на старіння бітуму. Зокрема ними встановлено, що асфальтени

та насичені вуглеводні не схильні до окиснення, у той час як інші складові значно змінюються під дією кисню (зі зменшенням реакційної здатності Rostler F. S. розташував складники в такому порядку – N, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>), перетворюючись один в одного (спостерігається швидке перетворення N в A<sub>1</sub> та дещо повільніше перетворення A<sub>1</sub> в A<sub>2</sub>). Таким чином, з часом у бітумі збільшується кількість асфальтенів і значно зменшується вміст мальтенів, зокрема полярних сполук та ацидафінів, що суттєво позначається на довговічності в'язучого. На основі отриманих даних було запропоновано [2] так званий аналіз Ростлера, використовуючи який можна встановити значення «мальтенової характеристики», тобто співвідношення між компонентами в'язучого  $((N+A_1)/(P+A_2))$  і оцінити схильність до старіння бітуму та його довговічність. Згідно зі значеннями «мальтенової характеристики» бітуми були поділені на п'ять груп: I група – з «мальтеновою характеристикою» на рівні 0,4...1,0 – мала найвищу довговічність; II – 1,0...1,2 – гарну довговічність; III – 1,2...1,5 – задовільну; IV – 1,5...1,7 – незадовільну та V – зі значенням «мальтенової характеристики» більше 1,7 мала найнижчу довговічність. Виходячи з цієї класифікації Rostler F. S. [2] запропонував для покращення якості та подовження довговічності асфальтобетонних покриттів, що певний час були в експлуатації, застосовувати омолоджувачі, до складу яких входять мальтени, що мають значення «мальтенової характеристики», близьке до 0,4. Використання таких омолоджувачів за рахунок їх проникнення на певну глибину асфальтобетонного покриття дозволить пластифікувати бітум і значно зменшити інтенсивність його старіння.

Rostler F. S. і White R. M. [2] виконали аналіз існуючих на той час омолоджувачів і розробили рекомендації щодо критеріїв і показників якості, які мають визначатися при оцінюванні ефективності їх застосування. Запропоновані показники

були поділені на дві групи: перша – показники, що визначають властивості омолоджувача (температура спалаху, в'язкість зпри температурі 25 °С, дисперсність емульсії, стабільність під час зберігання, залишок омолоджувача після розпаду емульсії); друга – показники, що характеризують вплив омолоджувача на властивості асфальтобетонного покриття (швидкість проникнення в покриття, глибина проникнення омолоджувача, проникність води в оброблене покриття, стійкість до стирання обробленого покриття).

Виконані в середині 70-х років минулого століття в США масштабні дослідження омолоджувачів, у тому числі чотирирічні дослідження Центру цивільного будівництва ВПС США та Інженерного корпусу армії США (досліджено вплив різних омолоджувачів на асфальтобетонні покриття, розташовані в різних кліматичних умовах – сухому і жаркому, вологому і теплому, холодному), підтвердили ефективність використання цих матеріалів для зменшення руйнування покриттів автомобільних доріг, що виникає через старіння бітумного в'язучого, і подовження їхнього терміну експлуатації [3]. Це сприяло поширенню використання омолоджувачів в різних штатах США (принаймні у восьми штатах діють специфікації на застосування омолоджувачів, наприклад REV 11-3-16 «Asphalt Rejuvenation»), а в подальшому і в різних країнах світу.

Boyer R. E. [3] встановив, що для ефективності відновлення якості асфальтобетонного покриття омолоджувач має проникати на певну глибину та відновлювати співвідношення між кількістю асфальтенів і мальтенів у бітумі. Оцінювання впливу омолоджувача на властивості бітумів може бути встановлено за зміною показників якості (пенетрація при 25 °С і в'язкість при 60 °С) в'язучого, екстрагованого з необробленого та обробленого омолоджувачем покриття [3].



Насьогодні існує значна кількість омолоджувачів, які розрізняються як за складом (поділяються на омолоджувачі, виготовлені на нафтовій або рослинній основі), так і сферою застосування (для відновлення існуючих асфальтобетонних покриттів і регенерації старого асфальтобетону), а дослідження щодо ефективності їх використання для покращення якості асфальтобетонних покриттів проведені в багатьох країнах світу [4–6].

За чисельними дослідженнями встановлено, що при застосуванні омолоджувачів вони адсорбуються у верхній шар асфальтобетонного покриття на глибину 10–20 мм [7]; збільшують значення пенетрації та зменшують температуру розм'якшеності бітуму [8]; знижують в'язкість до рівня вихідного бітуму, що використовувався для приготування асфальтобетонних сумішей, проте інші реологічні властивості (комплексний модуль пружності та кут зсуву) повністю не відновлюються [9, 10]; підвищують розтяжність майже до рівня вихідного бітуму [9]; знижують низькотемпературне розтріскування, визначенне за допомогою методу DT [9]; підвищують адгезійні властивості та водостійкість асфальтобетонного покриття [7, 9]; практично не впливають на експлуатаційні властивості асфальтобетонного покриття (слизкість і гальмівний шлях залишаються на рівні значень, що були в покриття до обробки; рівень шуму та водостійкість не змінюються) [11]; відновлення властивостей асфальтобетонного покриття шляхом використання омолоджувачів на рослинній основі майже на 25 % є більш екологічним, ніж традиційні методи [11]; доцільним є використання омолоджувачів на першому та п'ятому році експлуатації дорожнього покриття [12]; критеріями доцільності застосування омолоджувачів є зниження в'язкості при 60 °C та комплексного модуля при 60 °C екстрагованих бітумів більш ніж на 25 % для покриттів, що експлуатувалися менше трьох років, і зниження цих

показників більш ніж на 40 % для покриттів, що експлуатувалися більше трьох років [13]; найбільш придатними для обробки є асфальтобетонні покриття на автомобільних дорогах з відносно низькою інтенсивністю руху та дороги місцевого значення [12]; за рахунок використання омолоджувачів термін служби дорожнього покриття може бути подовжено до восьми років, що у свою чергу призведе до економії 29 % вартості експлуатації автомобільної дороги [12].

Останнім часом значного поширення набули омолоджувачі, виготовлені на рослинній основі [14], у яких як основні компоненти використовують оливи різних рослин (соняшник, кукурудза, льон, соя, ріпак, ричин, кеш'ю, насіння бавовни та інше), а також олеїнова кислота, відходи рослинних жирів, олія з відходів переробки деревини тощо. За даними ряду дослідників, омолоджувачі на рослинній основі є більш ефективними, ніж на нафтовій основі [15], що виражається в більшій адсорбції діючої речовини в шар покриття, більш ефективному зниженні температури розтріскування асфальтобетону та покращенні міцності від втомленості. До недоліків омолоджувачів на рослинній основі може бути віднесено необхідність додаткового введення до їхнього складу адгезійних добавок [15].

**Визначення мети і завдання дослідження.** Метою виконаної роботи було дослідження впливу на властивості нафтового дорожнього в'язкого бітуму та асфальтобетону, виготовленого на цьому в'язучому, першого вітчизняного омолоджувача Люкс «ЕД-Л», що виготовляється компанією НВП «Люкс-Х» (ТОВ). Для досягнення поставленої мети було вирішено такі завдання: оцінено вплив омолоджувача на якість вихідного та зістареного в лабораторних умовах бітуму; досліджено вплив добавки Люкс «ЕД-Л» на властивості асфальтобетонів, виготовлених з вихідних і зістарених асфальтобетонних сумішей; здійснено виробничу перевірку застосування омолоджувача для

покращення якості асфальтобетонного покриття автомобільної дороги.

**Основна частина дослідження.** Як об'єкти дослідження прийнято дорожній в'язкий бітум БНД 70/100 виробництва Мозирського НПЗ (республіка Білорусь), властивості якого відповідають вимогам ДСТУ 4044 [16]; омолоджувач Люкс «ЕД-Л» на рослинній основі, до складу якого введено поверхнево-активну добавку, що є хімічним аналогом Wetfix BE. Добавка Люкс «ЕД-Л» в дослідженні використовувалась у вигляді як добавки до бітуму (при оцінюванні впливу на якість бітуму), так і водної емульсії (для обробки асфальтобетонних сумішей у лабораторії та асфальтобетонного покриття на автомобільній дорозі). Омолоджувач вводився у бітум у двох концентраціях – 1 і 2,5 % маси бітуму. Прийнятні концентрації добавки відповідають концентраціям добавок, що наносяться на дорожнє покриття у вигляді водної емульсії в кількості відповідно 100 та 250 мл/м<sup>2</sup>.

Введення добавки в бітум здійснювалося шляхом змішування в лабораторній мішалці компонентів (вихідного бітуму БНД 70/100, попередньо нагрітого до температури суміщення, і добавки, що мала кімнатну температуру) впродовж 5–10 хв при температурі 150–155 °С.

Оцінювання впливу омолоджувача на властивості бітуму здійснювали за зміною стандартних показників якості – пенетрації і дуктильності при 25 °С, температур розм'якшеності і крихкості, зчеплюваності з поверхнею скла при температурі 85 °С і з кам'яним матеріалом (гранітний щебінь Мокрянського кар'єру фракції 5–10 мм) за методом обертання пляшки (Rolling Bottle Test) впродовж 6 год згідно з ДСТУ EN 12697-11 [19].

Визначення зчеплюваності з поверхнею скла здійснювалось шляхом витримання зразків у дистильованій воді при температурі 85 °С впродовж 50 хв. Зразки підготовлювались шляхом нанесення на медичне предметне скло

розміром 76 × 26 мм бітуму вагою 0,35 г і його рівномірного розподілення по всій площі скла шаром товщиною 200 мкм. За показник адгезії приймалося розраховане у відсотках відношення площі бітуму після випробування до площі бітуму до випробування.

Вплив омолоджувача на властивості бітуму оцінювався за трьома показниками: визначення впливу Люкс «ЕД-Л» на властивості вихідного бітуму; визначення здатності відновлювати властивості зістареного бітуму шляхом введення добавки в зістарене в'язуче; встановлення впливу на інтенсивність старіння шляхом зістарення бітуму, у який введено добавку Люкс «ЕД-Л».

Зістарювання в лабораторних умовах в'язучого здійснювалось за методом RTFOT за ДСТУ Б EN 12607-1 [17], що моделює зміну властивостей у бітумі після приготування асфальтобетонної суміші на виробництві. У роботі [18] наведено дані щодо впливу декількох циклів (RTFOT та PAV) лабораторного старіння бітумів на його властивості, згідно з якими встановлено, що найбільша зміна властивостей в'язучого відбувається під час першого циклу зістарювання. Виходячи з цього для перевірки впливу омолоджувача на властивості бітуму було прийнято один цикл зістарювання за RTFOT.

Введення до вихідного бітуму добавки Люкс «ЕД-Л» у кількості 1 та 2,5 % призводить до пластифікації в'язучого, що проявляється в збільшенні значень пенетрації при 25 °С (відповідно в 1,39 і 1,81 разу), зниженні температури розм'якшеності (відповідно на 1,2 та 3,7 °С) і зниженні температури крихкості (відповідно на 1 та 3 °С) (табл. 1). За рахунок такої зміни властивостей значення інтервалу пластичності в'язучого з омолоджувачем знаходиться на рівні значення вихідного бітуму. Найбільший ефект при введенні до вихідного бітуму добавки Люкс «ЕД-Л» спостерігається в значному збільшенні його адгезійних властивостей. Після

витримування в дистильованій воді при 85 °С впродовж 50 хв зчеплюваність із поверхнею скла підвищується з 26,8 % для вихідного бітуму до 91,8 та 98,3 % для в'язучих відповідно з 1 та 2,5 % добавки. Така сама тенденція спостерігається і при визначенні зчеплюваності методом обертання пляшки (рис. 1).

Введення добавки до зістареного бітуму призводить до практично повного «відновлення» його властивостей (табл. 1).

При введенні 1 % добавки властивості відновленого бітуму за показниками пенетрації, температур розм'якшеності та крихкості відповідають показникам якості вихідного бітуму, які були в нього до старіння за методом RTFOT. Єдиним показником, значення якого не відповідають значенням вихідного бітуму, є розтяжність при температурі 25 °С – значення цього показника зменшилися як відносно вихідного бітуму, так і зістареного.

Таблиця 1

Вплив омолоджувача Люкс «ЕД-Л» на властивості бітуму

Показник якості	Значення				
	для бітуму БНД 70/100	для бітуму БНД 70/100 + Люкс «ЕД-Л»		для зістареного бітуму БНД 70/100 + Люкс «ЕД-Л»	
Маркування	М	М1	М2,5	Мс1	Мс2,5
Концентрація добавки, %	-	1 %	2,5 %	1 %	2,5 %
Пенетрація при 25 °С, 0,1 мм	72	100	130	70	89
Температура розм'якшеності, °С	48,4	47,2	44,7	49,5	48,4
Температура крихкості, °С	-19	-20	-22	-19	-20
Дуктильність при 25 °С, см	91,3	91,1	87,6	70,7	69,2
Інтервал пластичності	67,4	67,2	66,7	68,5	68,4
Зчеплюваність із поверхнею скла, %	26,8	91,8	98,3	89,4	98,3
Зчеплюваність за методом обертання в пляшці, %	25,0	90,0	99,0	90,0	98,0
Маркування	Мс	М1с	М2,5с		
Старіння за методом RTFOT	Пенетрація при 25 °С, 0,1 мм	59	70	86	
	Залишкова пенетрація, %	81,9	70,0	66,2	
	Температура розм'якшеності, °С	51,6	50,4	48,4	
	Зміна температури розм'якшеності, °С	3,2	3,2	3,7	
	Температура крихкості, °С	-19,5	-20	-21	
	Розтяжність при 25 °С, см	75,9	70,6	67,8	
	Інтервал пластичності, °С	71,1	70,4	69,4	
	Зчеплюваність із поверхнею скла, %	11,0	52,6	98,3	
Зчеплюваність за методом обертання в пляшці, %	15,0	55,0	95,0		

Введення до зістареного бітуму добавки Люкс «ЕД-Л» в кількості 2,5 % призводить до ще більш значного «відновлення» його властивостей, особливо за показником глибини проникнення голки, який збільшується відносно зістареного бітуму Мс в 1,5 разу, а відносно вихідного

бітуму М в 1,24 разу. У той же час значення температур розм'якшеності та крихкості, а також інтервалу пластичності відповідають значенням вихідного бітуму М. Значною перевагою добавки Люкс «ЕД-Л» є її вплив на зчеплюваність в'язучого: порівняно зі зчеплюваністю з поверхнею скла

зістареного бітуму Мс, яка становить 11,0 %, введення до цього бітуму 1 та 2,5 % добавки призводить до збільшення зчеплюваності зі склом відповідно до 90 та

98 %. Ці залежності підтверджуються й даними визначення зчеплюваності методом обертання пляшки (рис. 1).

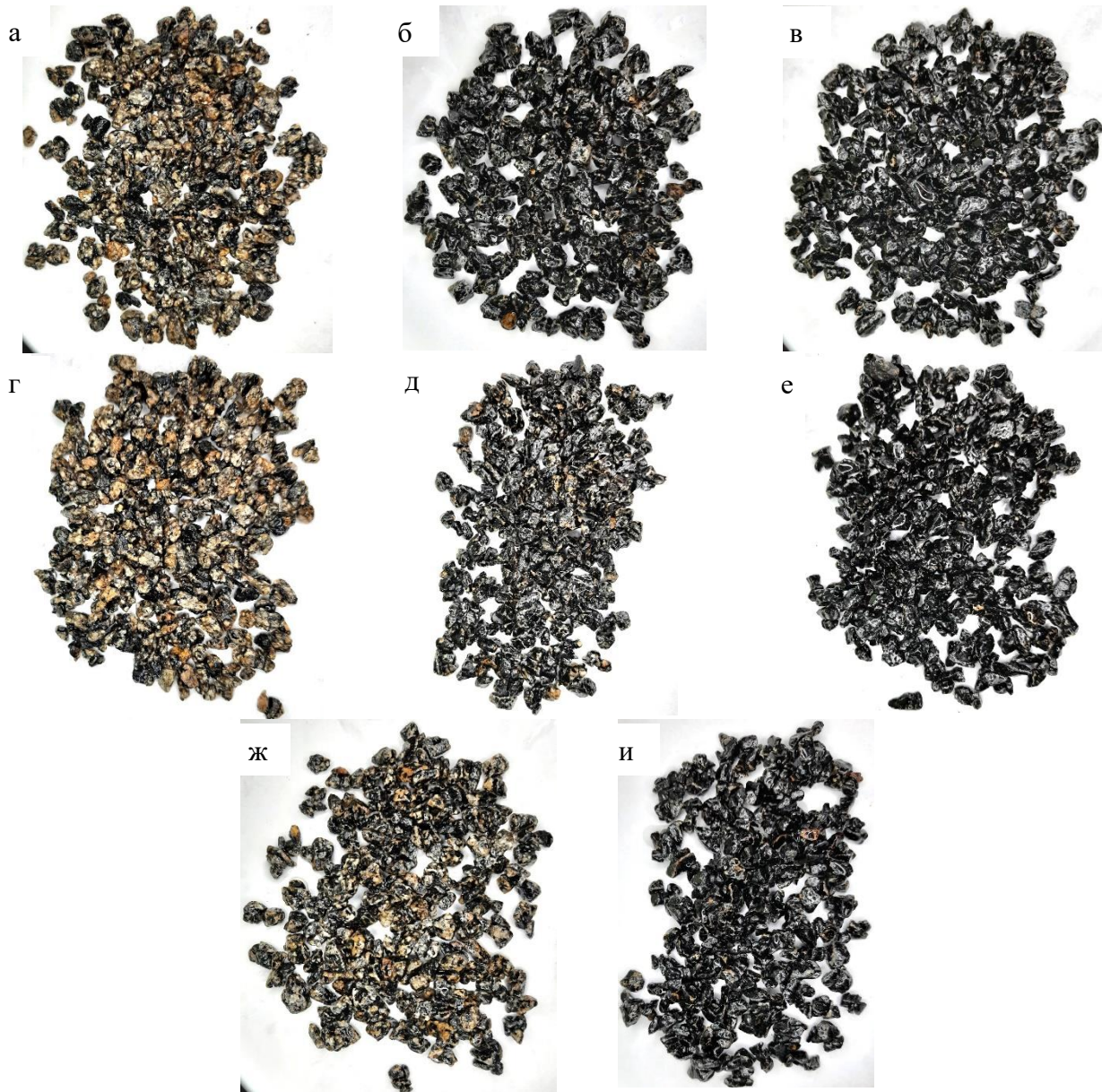


Рис. 1. Зовнішній вигляд зразків після випробування на зчеплюваність за методом обертання пляшки: а – бітум М; б – М1; в – М2,5; г – Мс; д – Мс1; е – Мс2,5; ж – М1с; и – М2,5с

Оцінювання впливу добавки Люкс «ЕД-Л» на інтенсивність старіння в'язучого виконували шляхом зістарювання в'язучого, до якого попередньо було введено омолоджувач. Отримані дані

свідчать про незначне прискорення процесів старіння бітуму при введенні до нього добавки, особливо при збільшенні концентрації добавки Люкс «ЕД-Л» в бітумі до 2,5 %. Це виражається в дещо більшій

зміні penetрації в'язучих (при старінні бітуму без добавки значення penetрації зменшуються в 1,22 разу, при старінні бітуму з 1 % добавкою – в 1,43 разу і при старінні з 2,5 % добавки – в 1,51 разу). При цьому значення температури розм'якшеності зі збільшенням концентрації добавки в бітумі майже не змінюються (відповідно на 3,2, 3,2 та 3,7 °С), причиною чого може бути інгібуюча дія поверхнево-активної речовини, що входить до складу добавки Люкс «ЕД-Л». Також майже не змінюється дуктильність – для бітуму без добавки зміна становить 15,4 см, а для бітумів, модифікованих 1 та 2,5 % добавки, зміни становлять відповідно 20,5 та 19,8 см, що знаходиться в межах похибки визначення цього показника.

Вплив омолоджувача Люкс «ЕД-Л» на адгезійну здатність в'язучого зберігається і у випадку його старіння. У той час, як у вихідного бітуму після старіння значення зчеплюваності з поверхнею скла зменшилось у 2,3 разу, у бітуму, модифікованого 1 % добавки, після старіння значення зчеплення з поверхнею скла зменшилася 1,4 разу, а у бітуму з 2,5 % добавки значення цього показника не змінилось. Отримані дані свідчать про високу термостабільність поверхнево-активної речовини, що входить до складу омолоджувача.

Оцінювання проникності омолоджувача крізь шар бітуму здійснено за зміною показника зчеплюваності з поверхнею скла. Були приготовлені три партії зразків (по 5 шт. в кожній партії) для встановлення зчеплюваності з поверхнею скла. Після охолодження зразків при кімнатній температурі на поверхню бітуму зразків другої та третьої партії нанесено омолоджувач в кількості відповідно 1 та 2,5 % вмісту бітуму зразка. Після витримання при кімнатній температурі протягом 1 год для всіх зразків визначено зчеплюваність шляхом витримання в дистильованій воді при 85 °С впродовж 50 хв. Наведені на рис. 2 отримані дані свідчать про те, що добавка Люкс «ЕД-Л»

адсорбувалась у шар бітуму і збільшила зчеплюваність в'язучого зі скляною підкладкою з 27,3 % у вихідного бітуму до 88,4 і 95,2 % у бітумів, на поверхню яких була нанесена добавка Люкс «ЕД-Л» в кількості відповідно 1 і 2,5 %.

Вплив омолоджувача на властивості асфальтобетону виявлено шляхом співставлення показників якості асфальтобетонних зразків, виготовлених з асфальтобетонної суміші типу Б на прийнятому в роботі бітумі БНД 70/100. Ущільнення асфальтобетонних сумішей здійснювалось укочуванням за допомогою секторного преса WSV-KW30.

Для дослідження було виготовлено чотири асфальтобетонні суміші: вихідна; зістарена вихідна; зістарена, що була оброблена омолоджувачем у кількості 250 мл/м<sup>2</sup> від площі поверхні ущільнених зразків; вихідна, що була оброблена омолоджувачем в кількості 250 мл/м<sup>2</sup> від площі поверхні зразків, і зістарена. Для моделювання зістарення асфальтобетонних сумішей використовувалась методика, наведена в AASHTO R 30-02 [20], згідно з якою виготовлена суміш розташовувалася на піддоні шаром завтовшки 20–25 мм і витримувалась у сушильній шафі при температурі 135 °С впродовж 4 год (методика моделює технологічне зістарювання суміші).

Для виготовлених асфальтобетонних зразків були визначені стандартні показники якості, значення яких наведено в табл. 2. Зістарювання асфальтобетонної суміші передбачувано призводить до збільшення показників якості – міцності на стиск при 25 та 50 °С, а також зниження водонасичення.

Властивості асфальтобетонів, виготовлених з зістареної суміші, яка перед формуванням була оброблена емульсією омолоджувача, практично повністю відповідають властивостям асфальтобетонів з вихідної суміші, що може свідчити про ефективність застосування омолоджувача Люкс «ЕД-Л».

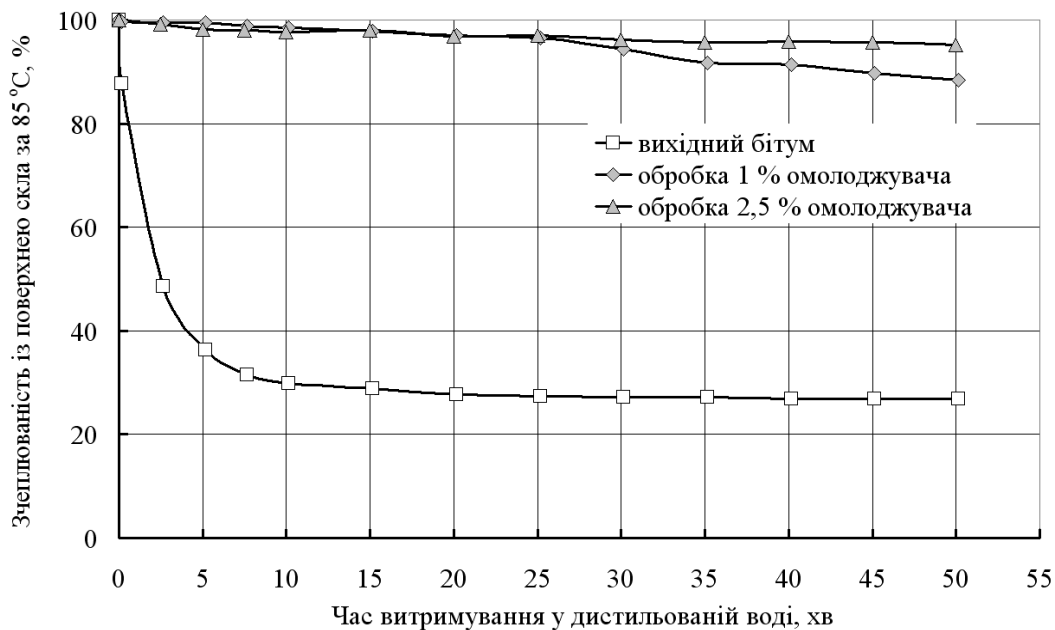


Рис. 2. Збільшення зчеплюваності бітумів із поверхнею скла за рахунок адсорбції омолоджувача через шар в'язучого

Порівняння властивостей асфальтобетонів, виготовлених з зістареної суміші та з вихідної суміші, що була оброблена омолоджувачем, а потім зістарена, свідчить про те, що використання добавки Люкс «ЕД-Л» сприяє зменшенню інтенсивності старіння асфальтобетону з часом – значення

показників міцності на стиск при 20 та 50 °С в обробленого асфальтобетону відповідно в 1,13 та 1,1 разу менше, ніж у необробленого асфальтобетону. Цю ж тенденцію підтверджують і значення коефіцієнта довготривалої водостійкості (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив омолоджувача Люкс «ЕД-Л» на властивості асфальтобетону

Асфальтобетон з суміші	Властивість				
	Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	Водонасичення, %	Міцність на стиск, МПа, при температурі		Коефіцієнт водостійкості
			20 °С	50 °С	
Вихідний	2405	1,4	3,48	1,42	0,90
Зістарений	2372	3,0	4,05	1,69	0,78
Зістарений, оброблений омолоджувачем	2417	1,6	3,11	1,45	0,95
Вихідний, оброблений омолоджувачем і зістарений	2377	3,1	3,57	1,54	0,90

Виробничу перевірку застосування омолоджувача для покращення якості асфальтобетонного покриття здійснено на ділянці довжиною в 100 м автомобільної дороги, розташованої в смт Світлогорське

Дніпропетровської області (рис. 3). Термін служби асфальтобетонного покриття становив п'ять років, стан покриття був задовільним (відсутні поверхневі деформації).



Рис. 3. Розподілення добавки та зовнішній вигляд поверхні асфальтобетонного покриття через 30 хв після обробки покриття омолоджувачем Люкс «ЕД-Л»

Для полегшення нанесення омолоджувача на поверхню дорожнього покриття воднева емульсія добавки Люкс «ЕД-Л» була розбавлена водою в співвідношенні 1:1. Витрати розбавленої емульсії склали 0,1 л/м<sup>2</sup>.

Через 40 хв після нанесення емульсії, за візуальним оцінюванням, вона повністю адсорбувалась у шар асфальтобетонного

покриття (відсутність вологи на поверхні, зміна кольору, відсутність масляної плівки на поверхні), було відкрито рух автомобільного транспорту.

За візуальним оцінюванням, після нанесення омолоджувача спостерігалися пластифікація в'язучого (воно стало більш м'яким) на поверхні покриття і зникнення дрібних тріщин шириною до 2–3 мм (рис. 4).



Рис. 4. Поверхня асфальтобетонного покриття до та після обробки омолоджувачем

Для оцінювання ефективності впливу омолоджувача Люкс «ЕД-Л» на властивості асфальтобетонного покриття на виробничій ділянці було відібрано вирубку до обробки та будуть відібрані вирубку після трьох і дев'яти місяців експлуатації для визначення показників якості асфальтобетону.

**Висновки.** На основі отриманих експериментальних даних встановлено, що введення добавки Люкс «ЕД-Л» до

зістареного за методикою RTFOT бітуму призводить до відновлення його властивостей, що виражається в поверненні значень стандартних показників якості (пенетрація, температура розм'якшення і крихкості) до рівня значень показників якості бітуму до старіння. Добавка Люкс «ЕД-Л» значно покращує адгезійні властивості бітуму (як вихідного, так і зістареного). Оцінювання впливу

омолоджувача на властивості зістарених асфальтобетонних сумішей підтвердило його ефективність – властивості асфальтобетонів, виготовлених з зістарених сумішей, що були оброблені добавкою Люкс «ЕД-Л»,

за визначеними показниками якості повністю відповідають показникам асфальтобетону, виготовленого з вихідної суміші.

### Список використаних джерел

1. Дорожный асфальтобетон / Л. Б. Гезенцевей, Н. В. Горельшев, А. М. Богуславский, И. В. Королев. Москва: Транспорт, 1985. 350 с.
2. Rostler F. S., White R. M. Rejuvenation of Asphalt Pavements. Materials research and development INC. Oakland CA. United States, 1970. 68 p.
3. Boyer R. E. Asphalt rejuvenators «fact, or fable». *Transportation systems*. 2000. Т. 58. P. 1-17.
4. Apostolidis P., Liu X., Kasbergen C., Scarpas A. T. Synthesis of asphalt binder aging and the state of the art of antiaging technologies. *Transportation Research Record*. 2017. Т. 2633. № 1. P. 147-153. URL: <https://doi.org/10.3141/2633-17>.
5. Al-Saffar Z. H. et al. A review on rejuvenating materials used with reclaimed hot mix asphalt. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2021. Т. 48. №. 3. P. 233-249.
6. Loise V., Caputo P., Porto M., Calandra P., Angelico R., Oliviero Rossi C. A review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, materials, methods and perspectives. *Applied Sciences*. 2019. Т. 9. №. 20. P. 4316. URL: <https://doi:10.3390/app9204316>.
7. Zhang Y., Van de Ven M. F., Molenaar A. A. A., Woldekidan M. F., Wu S. Mechanical properties of porous asphalt concrete with rejuvenators. *Proceedings of the international conferences on the bearing capacity of roads, railways and airfields*. Vol. 2. 2013. P. 637-646.
8. Kavussi A., Tanzadeh R. Application of slow curing bitumen as a rejuvenating agent in aged bituminous mixes. *Advanced Materials Research*. 2012. Т. 587. P. 62-66. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.587.62>.
9. Zhang J. et al. Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP. *Construction and Building Materials*. 2020. Т. 239. C. 117755. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117755>.
10. Lin J., Guo P., Xie J., Wu S., Chen M. Effect of rejuvenator sealer materials on the properties of aged asphalt binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013. Т.25. №.7. P. 829-835. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000702.
11. Su Z., Giezen W., Zandvoort F. Technical and environmental benefits of rejuvenation maintenance solutions for porous asphalt pavements. *Eurasphalt & Eurobitume Congress, 5th, 2012, Istanbul, Turkey*. 2012. P. 1-8.
12. Vitale J., & Siddiqi K. M. (2016). The feasibility of asphalt pavement rejuvenator applications. In *52<sup>nd</sup> ASC Annual International Conference Proceedings. Associated Schools of Construction*. 2016. 8 p.
13. O'Connell J., Rampersad A., Lavelle R. The evaluation of asphalt mix surface rejuvenators in South Africa. In *36<sup>th</sup> Southern African Transport Conference (SATC 2017) 10–13 July 2017, Pretoria, South Africa*. P. 296–307.
14. Prospero E., Bocci E. A Review on Bitumen Aging and Rejuvenation Chemistry: Processes, Materials and Analyses. *Sustainability*. 2021. Т. 13. № 12. P. 6523. URL: <https://doi.org/10.3390/su13126523>.
15. Zaumanis M., Mallick R. B., Poulikakos L., Frank, R.. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100 % recycled asphalt



mixtures. *Construction and Building Materials*, 2014. 71. P. 538-550. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>.

16. ДСТУ 4044:2019. Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови. [Чинний з 2020-05-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 12 с.

17. ДСТУ Б EN 12607-1:2015 (EN 12607-1:2014, IDT). Бітум та бітумні в'язучі. Визначення опору до твердіння під впливом теплоти та повітря. Частина 1. Метод RTFOT. [Чинний з 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2016. 23 с.

18. Blomberg T., Makowska M., Pellinen T. Laboratory simulation of bitumen aging and rejuvenation to mimic multiple cycles of reuse. *Transportation Research Procedia*. 2016. Т. 14. P. 694-703. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.335>.

19. ДСТУ EN 12697-11:2018 (EN 12697-11:2012, IDT). Бітумомінеральні суміші. Методи випробування гарячих асфальтобетонних сумішей. Частина 11. Визначення зчеплюваності між заповнювачем і бітумом. [Чинний з 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2018. 41 с.

20. AASHTO R 30-02. Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA). AASHTO. Washington D.C. 2019. 5 p.

---

Пиріг Ян Іванович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, кафедра технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

ORCID iD: 0000-0003-0957-2251. Тел.: (098) 44-66-268. E-mail: [pirig2000@gmail.com](mailto:pirig2000@gmail.com).

Галкін Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, кафедра технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. ORCID iD: 0000-0002-1904-5618.

Тел.: (067) 799-64-32. E-mail: [a.galkin0906@gmail.com](mailto:a.galkin0906@gmail.com).

Оксак Сергій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

ORCID iD: 0000-0002-3084-3469. Тел.: (066) 715-27-52. E-mail: [sv.oksak@gmail.com](mailto:sv.oksak@gmail.com).

Ільїн Ярослав Вікторович, кандидат технічних наук, кафедра технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. ORCID iD: 0000-0003-2998-3955.

Тел.: (050) 144-50-64. E-mail: [yailin12011993@gmail.com](mailto:yailin12011993@gmail.com).

Шийка Яна Павлівна, головний хімік, НВП «Люкс-Х» (ТОВ). ORCID iD: 0000-0003-1470-9363.

Тел.: (066)4495660. E-mail: [shuikayana@gmail.com](mailto:shuikayana@gmail.com).

Pyrig Yan, Ph.D. (Eng.), S. Researcher, department of technologies of road-building materials, Kharkov National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0003-0957-2251. Tel.: (098) 44-66-268.

E-mail: [pirig2000@gmail.com](mailto:pirig2000@gmail.com).

Galkin Andrii, Ph.D. (Eng.), department of technologies of road-building materials, Kharkov National Automobile and Highway University, ORCID iD: 0000-0002-1904-5618. Tel.: (067) 799-64-32. E-mail: [a.galkin0906@gmail.com](mailto:a.galkin0906@gmail.com).

Oksak Serhii, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, department of technologies of road-building materials, Kharkov National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0002-3084-3469. Tel.: (066) 715-27-52.

E-mail: [sv.oksak@gmail.com](mailto:sv.oksak@gmail.com).

Ilin Yaroslav, Ph.D. (Eng.), department of technologies of road-building materials, Kharkov National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0003-2998-3955. Tel.: (050) 144-50-64. E-mail: [yailin12011993@gmail.com](mailto:yailin12011993@gmail.com).

Shyika Yana, chief chemist, Reserch and Production Enterprise «Lux-X». ORCID iD: 0000-0003-1470-9363.

Тел.: (066)4495660. E-mail: [shuikayana@gmail.com](mailto:shuikayana@gmail.com).

Статтю прийнято 14.07.2021 р.

УДК 624.21:69.059.2

## СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ДЕФЕКТІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТІВ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЇХ ОБСТЕЖЕННЯ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, асп. Р. В. Юрченко

## DEFECTS SYSTEMATIZATION OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES OF UKRAINIAN RAILWAYS AS THE RESULT OF THEIR INSPECTION

D. Sc. (Tech.) L. Trykoz, postgraduate student R. Yurchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248116>

---

**Анотація.** У статті наведено результати обстежень 118 залізобетонних мостів на залізницях України, при яких зовнішні ознаки пошкоджень зіставлені з найімовірнішими причинами їх виникнення і категорією дефекту. Встановлено, що найпоширенішими причинами виникнення дефектів і пошкоджень є дія природних чинників (зміна температури та вологості), техногенних (вібрація, струми витоку) і технологічних (недоліки виготовлення або улаштування). Для кожного виду дефекту передбачено свій вид робіт: торкретування, улаштування металообойми, нанесення гідроізоляційного шару. Вказану систематизацію рекомендується застосовувати при нагляді за спорудами і призначенні заходів з їх ремонту і захисту залежно від категорії дефекту і причин його виникнення.

**Ключові слова:** дефект, категорія дефекту, обстеження, залізобетонний міст.

**Abstract.** Visual inspection is the important part of the bridges management. Many defects can be detected that determine the traffic conditions, service life, and operation cost. The deterioration of bridges calls for effective methods for condition evaluation and maintenance as well as suitable methods of their repair and recovery. This article aims defects systematization of reinforced concrete bridges to define the effective method for recovering of their technical state. More than 100 reinforced concrete bridges in Ukrainian railways were inspected from 2017 to 2021. Ultrasonic pulse velocity, penetration resistance, reinforcement corrosion tests, and rebar locating were performed on beams, bed block, and piers of reinforced concrete bridges. It is shown that the most probable reasons of defects are natural impacts (freezing-thawing, moisturizing-drying), technogenic factors (train vibration, leakage current), and technological disadvantages (unsatisfactory production or setting). During the inspection, there are three categories of defects were defined. The first one does not influence the train traffic (for example, deficient protective concrete layer). The second one can limit the train traffic (for instance, crack width more than 0.3 mm). The third category endangers the safe railway operation (such as an intense leaching of cement stone at an area more than 2 m<sup>2</sup>). It is made a proposal to match external signs of damage with reasons their appearance and methods of recovery. Three main types of repairs are used in Ukrainian railways: torkret process, steel hooping, waterproof layer. However, the relationship between the type of defect and the method of recovery has not been estimated before. It is important that the methods of repair and protection will be assigned according to their operation state (a disabled state requires immediate recovery of the structures) as well as the reasons of appearance (destructive acts). These methods must prevent a future destruction or protect of the structures.

**Keywords:** defect, type of defect, inspection, reinforced concrete bridge

**Вступ.** На залізницях України експлуатується значна кількість залізобетонних мостів. При обстеженні в їхніх конструкціях постійно виявляються пошкодження, розвиток яких призводить до передчасного виходу з ладу конструктивних елементів, зниження надійності, довговічності та безпеки експлуатації споруд і вимагає своєчасного відновлення їхніх експлуатаційних властивостей, ремонту і захисту від руйнівних дій. Виникнення і розвиток пошкоджень обумовлені не тільки силовими навантаженнями, на які конструкції розраховані ще на стадії проектування, але й руйнівними діями різної природи, у т. ч. струмами витоку та блукаючими струмами, вібрацією, ґрунтовими водами.

Проте на нормативному рівні питання зіставлення наявних пошкоджень з природою та інтенсивністю руйнівних дій і призначенням відповідних способів захисту від них при ремонті вирішено недостатньо. Це обумовлює недостатню ефективність традиційних заходів ремонту і захисту від руйнівних дій. Виходячи з цього систематизація дефектів залізобетонних мостів залізниць з установами їхнього взаємозв'язку з природою та інтенсивністю руйнівних дій для пошуку оптимального варіанта захисту або відновлення конструкцій є актуальним практичним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемі своєчасного виявлення дефектів присвячено публікації вітчизняних і закордонних дослідників. Так, у роботі [1] запропоновано стратегію експлуатації «без капітального ремонту», яка передбачає зменшення інтервалів між планово-попереджувальними ремонтами, витрати на які вище, ніж витрати на догляд і профілактику, але значно нижче витрат на ремонт. Важливою ланкою є прогнозування зміни фізичного стану мостів. Причому тут слід прагнути до підвищення об'єктивності прогнозу, щоб прогнозування здійснювалося розрахунковим шляхом, а не експертним. Оцінювання стану за бальною оцінкою відповідно до роботи [2] є на сьогодні суб'єктивним, а не об'єктивним показником. Зокрема суб'єктивно на підставі особистого досвіду працівника оцінюються наявність

дефектів, що знижують термін служби споруд або їхніх несучих конструкцій (якісне оцінювання); кількість (відсоток) елементів з дефектами; поширеність дефектів. Але прогнозування розвитку дефектів для планування витрат на планово-попереджувальні роботи ця стратегія не передбачає. У статті [3] розглядаються три методи оцінювання технічного стану залізобетонних залізничних мостів: метод класифікації, бальної оцінки та метод теорії ймовірності. Авторами роботи [3] встановлено, що методи бальної оцінки та теорії ймовірності дають схожі результати, які відрізняються від результатів методу класифікації. При розрахунках прогнотивних будов методом класифікації визначаються внутрішні сили, а методи бальної оцінки та теорії ймовірності робляться тільки на основі візуальних обстежень і випробувань. Якщо в перших двох методах враховуються всі наявні на споруді дефекти, то в методі класифікації тільки дефекти, що знижують вантажопідйомність. Отже, комплексне застосування цих методів є одним із способів визначення правильної оцінки технічного стану залізобетонних залізничних мостів. Недоліком кожного методу є використання в розрахунках ідеалізованих і спрощених моделей, у яких неможливе врахування всіх діючих на конструкцію силових чинників, дефектів і пошкоджень, а також причин їх виникнення. Мета дослідження роботи [4] полягала у виявленні впливу окремих дефектів мостового полотна на технічний стан несучих конструкцій автодорожніх мостів. Процес визначення ступеня зносу потребує високої кваліфікації фахівця-експерта або більш повноцінної, деталізованої таблиці для оцінювання показників зносу, ніж пропонують сучасні норми. Авторами зроблено висновок, що вітчизняні чинні норми не дають можливості оцінювати вплив окремих дефектів на зниження швидкості руху, фактичну несучу здатність (вантажопідйомність) головних елементів і потребують удосконалення.

Балова оцінка була покладена в основу оцінювання стану бетонних мостів у роботі [5]. Результати візуального огляду 123 бе-

тонних мостів показали, що більшість мостів на сільських і основних дорогах вимагають ремонту і технічного обслуговування на основі виставлених балів (відповідно 82,4 і 88,2 бала зі 100). Мости на автомагістралях і автострадах знаходяться в кращому стані, ніж мости на сільських і основних дорогах (91,4 бала зі 100). Використання нових пристроїв, наприклад оптоволоконні або бездротові датчики, при будівництві або ремонті мостів забезпечить ефективне обслуговування. Впровадження цих технологій дозволяє уникнути тривалих виїздів на місця для візуального огляду, усуваючи суб'єктивність процесу. У багатьох країнах розробляються нові стандарти стосовно моніторингу стану конструкцій. У роботі [6] перераховано коди і стандарти обслуговування і моніторингу мостів з Австралії, Китаю, Канади, Європейського Союзу, Великобританії, Швейцарії і США. Ці документи є частиною різних регіональних, національних або міжнародних стандартів різних країн або адміністрацій. Ці стандарти визначають загальну кількість датчиків, які будуть розміщені на конструкції, їх розташування, відстань між ними, а також алгоритми та обробку даних. Нормативні документи охоплюють також такі теми, як ремонт і посилення конструкцій (використання армованих волокон полімерів), інтелектуальне зондування (вбудовані оптоволоконні датчики, датчики з волоконними ґратками), економічне значення (термін служби конструкцій), віддалений моніторинг та інтелектуальна обробка. Новим є підхід, який передбачає, щоб датчики стали частиною вимог для майбутнього проектування і будівництва мостів. Тобто система моніторингу стану конструкцій буде закладатися ще на стадії проектування.

Основною метою дослідження роботи [7] було розроблення комплексної системи моніторингу для оцінювання довговічності мостів. Система має інтегрувати реальну практику, в основному засновану на візуальному огляді, і поєднувати реакцію ряду різних надійних датчиків, установлених на конструкції для відстеження

прогресу пошкодження, з поліпшеними реалістичними моделями руйнування. Система і датчики були розроблені для визначення параметрів найбільш важливих механізмів руйнування: корозії арматури в мостах, карбонізації бетону, циклів заморожування-відтавання, лужно-кремнеземної реакції і механічних пошкоджень, а також змін у поведінці конструкцій: статична деформація, напруження, ширина тріщин і коливання. Використання систем постійного моніторингу дає кілька переваг після встановлення системи: зниження експлуатаційних витрат на перевірки і технічне обслуговування на 25 %, на 30 % за рахунок скорочення кількості та обсягу перевірок на об'єкті та зниження загальних витрат на термін служби мостів, на 10 % за рахунок застосування поліпшених моделей прогнозування терміну служби ще на стадії проектування. Постійний моніторинг мостів є ключовим аспектом, який розглядається в роботах [8÷10]. Недоліком візуального обстеження є неможливість визначити внутрішні дефекти [8], але це єдиний шлях для оцінювання характеристик конструкції в різних умовах навколишнього середовища і навантаження, а також для виявлення можливого зносу конструкції з часом [9]. Отже, візуальне оцінювання технічного стану набуває актуальності через необхідність врахування умов експлуатації конструкцій і планування науково обґрунтованих ремонтних робіт при обмеженому їх фінансуванні.

**Визначення мети і завдання дослідження.** Метою є систематизація дефектів і пошкоджень залізобетонних конструкцій мостів, розташованих на залізницях України, для визначення оптимального способу відновлення їхнього технічного стану. Для досягнення мети було поставлено такі завдання: обстежити певну кількість залізобетонних залізничних мостів; виявити наявність відповідних дефектів і пошкоджень; класифікувати їх за категоріями; встановити найімовірніші причини виникнення

дефектів і пошкоджень; проаналізувати існуючі методи ремонту або відновлення.

*Методи дослідження.* Для виявлення дефектів застосовувалися візуальні та інструментальні методи обстеження згідно з роботою [11]. Візуальні методи полягають в огляді конструкцій із виявленням усіх дефектів і пошкоджень (зміщення в плані, осідання, крени, прогини тощо) з їх ескізуванням, фото та/або відеозйомкою. До складу детальних обстежень залізобетонних конструкцій входить:

- визначення розмірів деформацій, ширини розкриття і глибини тріщин, перерізів арматури, товщини захисного шару бетону, відколів бетону, фактичного армування залізобетонних конструкцій;

- визначення ступеня пошкодження арматури корозією, глибини та ступеня карбонізації бетону, концентрації хлоридів, електричного потенціалу;

- обмірювання загальних розмірів конструкцій і їхніх перерізів, інструментальні вимірювання для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів.

Визначення характеристик бетону виконувалося неруйнівними методами: склерометричним за роботою [12] і ультразвуковим за роботою [13]. Товщина захисного шару бетону вимірювалася за роботою [14].

#### **Основна частина досліджень.**

Структурні підрозділи АТ «Укрзалізниця» при утриманні, оцінюванні стану і виявленні пошкоджень керуються інструктивними документами [2, 11, 15]. Порядок виконання обстежень регламентується ДБН В.2.3-6 [11]. Узагальненою характеристикою технічного стану споруди є її експлуатаційний стан, який визначається середньою баловою оцінкою згідно з СОУ «Оцінка технічного стану та експлуатаційної придатності інженерних споруд на залізницях України» [2]. В Інструкції ЦП-0282 [15] перелічено відповідні заходи щодо підвищення показників технічного стану споруди на підставі визначеного експлуатаційного стану. У нормативному документі [2] наводиться характеристика дефектів штучних споруд за їхнім

впливом на безпеку руху поїздів, довговічність споруд і умови їх обслуговування:

I категорія – погіршує умови обслуговування, знижує довговічність споруди, але розвиток дефекту не впливає на пропускання рухомого складу (наприклад морозне лущення поверхні бетону з оголенням крупного заповнювача, тріщини вздовж робочої арматури з розкриттям до 0,3 мм, відсутній або недостатній захисний шар бетону та ін.);



II категорія – розвиток дефекту може обмежити пропускання рухомого складу і створити загрозу безпеці руху (наприклад сильне осередкове вилуговування цементного каменю з утворенням сталактитів, тріщини вздовж робочої арматури з розкриттям більше 0,3 мм, корозія робочої арматури з ослабленням перерізу на 20 % та ін.);

III категорія – загрожує безпеці руху поїздів, потребує особливих умов експлуатування аж до введення попереджень (наприклад руйнування бетону на торцевій ділянці в місцях установавання анкерів, похилі тріщини з розкриттям більше 0,3 мм, сильне вилуговування цементного каменю на площі більше 2 м<sup>2</sup> з утворенням сталактитів та ін.).



У період з березня 2017 р. по квітень 2021 р. було проведено натурні дослідження характерних пошкоджень 118 залізобетонних мостів, які розташовані на регіональних філіях «Південна залізниця», «Південно-Західна залізниця», «Донецька залізниця» АТ «Укрзалізниця». Результати досліджень узагальнені в таблиці, де зовнішні ознаки дефектів зіставлені з найімовірнішими причинами їх виникнення та існуючими методами ремонту. Очевидно, що заходи з ремонту і захисту споруд слід призначати залежно від їхнього експлуатаційного стану (непрацездатний стан вимагає негайного ремонту або реконструкції споруди) і причин виникнення пошкоджень (руйнівних дій), причому ці заходи мають запобігати подальшій руйнівній дії на конструкції або захищати від них.

Таблиця



Дефекти залізобетонних мостів залізниць

Номер	Вид конструкції	Номер типу дефекту	Опис дефекту	Фото пошкодження	Найімовірніша причина виникнення	Існуючий метод ремонту/відновлення
1	2	3	4	5	6	7
1	Прогонова будова	1.1	Руйнування бетону біля опорних частин		Спільна дія попереминого заморожування – відтавання, вібрації, електричних струмів (витоку і блукаючих)	Відновлення споруди торкретуванням
		1.2	Тріщини вздовж стрижнів робочої арматури		Спільна дія попереминого заморожування – відтавання, електричних струмів (витоку і блукаючих), корозія робочої арматури	Улаштування металообойми

Продовження таблиці



1	2	3	4	5	6	7
1	Прогонова будова	1.3	Відшарування захисного шару		Спільна дія поперемінного заморожування – відтавання, вібрації, недостатня товщина захисного шару	Улаштування металообойми
		1.4	Вилуговування цементного каменю		Фільтрація слабкомінералізованих вод через тіло конструкції	Очищення споруди та нанесення гідроізоляційного шару

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7
		1.5	Раковини та сколи бетону		Спільна дія попереминого заморжування – відтавання, вібрації, електричних струмів (витоку і блукаючих)	Улаштування металообойми
1	Прогонова будова	1.6	Корозія арматури		Дія електричних струмів (витоку і блукаючих), недостатня товщина захисного шару	Очищення арматури від слідів корозії та улаштування металообойми



Продовження таблиці

1					6	7
2						
2	Опори	2.1	Тріщини		Спільна дія попереминого заморожування – відтавання, вібрації, електричних струмів (витоку і блукаючих)	Улаштування металообойми
		2.2	Вилугування цементного каменю		Фільтрація слабкомінералізованих вод через тіло конструкції	Очищення споруди та нанесення гідроізоляційного шару

Закінчення таблиці

1	2	3	4	5	6	7
3	Підферментний блок	3.1	Тріщини		Спільна дія поперемінного заморожування – відтавання, вібрації, електричних струмів	Улаштування металообойми
		3.2	Відшарування захисного шару		Недостатня товщина захисного шару бетону, вплив електричних струмів	Відновлення споруди торкретуванням

**Висновки.** Запропоновано систематизацію пошкоджень залізобетонних мостів залізниць з їх нумерацію за типами, у якій зовнішні ознаки пошкоджень зіставлені з найімовірнішими причинами їх виникнення і категорією дефекту. Встановлено, що найімовірнішими причинами виникнення дефектів і пошкоджень є спільна дія природних (поперемінне заморожування-відтавання, зволоження-висушування) і техногенних (вібрація, електричні струми) чинників. Також можна відокремити причини технологічного характеру – недостатню товщину захисного шару при виготовленні конструкції або неякісне улаштування

гідроізоляції, через що відбувається фільтрація води крізь конструкцію з вилуговуванням цементного каменю. Для відновлення або ремонту конструкцій мостів застосовують три види робіт: торкретування, улаштування металообойми, нанесення гідроізоляційного шару. Вказану систематизацію рекомендується застосовувати при нагляді за спорудами і призначенні заходів з їх ремонту і захисту залежно від категорії дефекту і причин його виникнення. Подальше дослідження буде спрямоване на пошук сучасних ремонтних матеріалів, ефективних антикорозійних систем, сухих бетонних і полімер-бетонних сумішей тощо.

### Список використаних джерел

1. Бильченко А. В., Кислов А. Г. Особенности системы мониторинга физического состояния городских мостов. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2011. Вип. 39. С. 23–26. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2011/6866> (дата звернення: 08.08.2021).
2. СОУ 45.120-00034045-015:2012. Оцінка технічного стану та експлуатаційної придатності інженерних споруд, затверджений наказом Укрзалізниці від 27.11.2012 р. № 419-Ц. Київ: Держадміністрація залізничного транспорту України, 2012. 98 с.
3. Гармаш А. В., Соломка В. І., Горбова О. В. Оцінювання технічного стану залізобетонних залізничних мостів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2011. Вип. 39. С. 33–36. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2011/6868> (дата звернення: 08.08.2021).
4. Безбабічева О. І., Лозова О. О. Дослідження впливу деяких дефектів мостового полотна на технічний стан мостових споруд. *Вісник ХНАДУ*. 2019. Вип. 84. С. 31-36. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.84.0.31> (дата звернення: 08.08.2021).
5. Lima M. M., Miller D., Doh J. Structural Health Monitoring of Concrete Bridges in Guilan Province Based on a Visual Inspection Method. *Structural Durability and Health Monitoring*. 2013. Vol. 9(4). P. 269–285. URL: <https://doi.org/10.32604/sdhm.2013.009.269> (last access: 08.08.2021).
6. Moreu F., Li X., Li S., Zhang D. Technical Specifications of Structural Health Monitoring for Highway Bridges: New Chinese Structural Health Monitoring Code. *Frontiers in Built Environment*. 2018. Vol. 4. P. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00010> (last access: 08.08.2021).
7. Comisu C.-C., Taranu N., Boaca G., Scutaru M.-C. Structural health monitoring system of bridges. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 199. P. 2054-2059. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.472> (last access: 08.08.2021).
8. Cunha A., Caetano E., Magalhães F., Moutinho C. Recent perspectives in dynamic testing and monitoring of bridges. *Structural Control and Health Monitoring*. 2013. Vol. 20 (6). P. 853-877. URL: <https://doi.org/10.1002/stc.1516> (last access: 08.08.2021).
9. Fujino Y., Siringoringo D. M. Abe M. Japan's experience on long-span bridges monitoring. *Structural Monitoring and Maintenance*. 2016. Vol. 3(3). P. 233-257. URL: <https://doi.org/10.12989/smm.2016.3.3.233> (last access: 08.08.2021).

10. Tan Z. C., Qiu S., Liu Y. Development and Challenge of Structural Health Monitoring of Long-Span Bridges. *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 619. P. 51–59. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.619.51> (last access: 08.08.2021).

11. ДБН В.2.3-6:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 63 с.

12. ДСТУ Б В.2.7-220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 20 с.

13. ДСТУ Б В.2.7-226:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 27 с.

14. ДСТУ Б В.2.6-4-95 (ГОСТ 22904-93). Конструкції будинків і споруд. Конструкції залізобетонні. Магнітний метод визначення товщини захисного шару бетону і розташування арматури. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 17 с.

15. ВНДУЗ 32.2.04-015-2013. ЦП «ЦП-0282 Інструкція з утримання штучних споруд», затверджена наказом Укрзалізниці від 13.02.2013 р. № 027-Ц/од. Київ: Держадміністрація залізничного транспорту України, 2013. 161 с.

---

Трикоз Людмила Вікторівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68.

E-mail: lvtrikoz@ukr.net ORCID 0000-0002-8531-7546.

Юрченко Руслан Валентинович, здобувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68. E-mail: uruslanv1994@gmail.com. ORCID 0000-0003-4695-2958.

Trykoz Liudmyla, DSc, professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net ORCID 0000-0002-8531-7546.

Yurchenko Ruslan, postgraduate student, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: uruslanv1994@gmail.com ORCID 0000-0003-4695-2958.

Статтю прийнято 16.07.2021 р.

УДК 624.012.35:620.173/174

## МОДЕЛЬ РІВНЕВОГО УТВОРЕННЯ ТА РОЗКРИТТЯ НОРМАЛЬНИХ ТРІЩИН У РОЗТЯГНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Канд. техн. наук О. В. Ромашко-Майструк, д-р техн. наук В. М. Ромашко

## MODEL OF NORMAL CRACKS LEVEL FORMATION AND OPENING IN STRETCHED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

PhD. (Tech.) O. V. Romashko-Maistruk, D. Sc. (Tech.) V. M. Romashko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248117>

---

*Анотація.* У статті висвітлено найважливіші результати досліджень механізму утворення та розкриття нормальних тріщин у розтягнутих залізобетонних елементах у процесі їх деформування. Виконано критичний аналіз існуючих методів розрахунку рівневого утворення та розкриття нормальних тріщин, у яких зчеплення арматури з бетоном враховується безпосередньо чи опосередковано. Експериментально підтверджено, що процес

---

утворення тріщин загалом є рівневим. Наведено основні характеристики дослідних зразків, за результатами випробування яких встановлено, що в практичних розрахунках тріщиностійкості залізобетонних елементів зазвичай можна обмежуватися двома рівнями утворення нормальних тріщин. Для вказаних рівнів утворення тріщин встановлено відповідні їм рівні завантаження, крок і ширина розкриття тріщин.

Розроблено загальну та спрощену методика розрахунку рівневого утворення та розкриття нормальних тріщин у залізобетонних елементах. Проведено відповідні статистичні порівняння результатів розрахунків за цими методиками з дослідними даними. Оцінено ефективність розроблених методів розрахунку рівневого утворення та розкриття нормальних тріщин через їх порівняння з уже існуючими методами.

**Ключові слова:** залізобетон, елементи, деформування, нормальні тріщини, рівні утворення, крок, ширина розкриття.

**Abstract.** The article highlights the most important studies results of the mechanism of normal cracks formation and opening in stretched reinforced concrete elements during their deformation. A critical analysis of the existing methods and ways for calculating normal cracks level formation and opening, in which the reinforcement to concrete adhesion is taken into account directly or indirectly, is carried out. The main advantages and disadvantages of each of these methods are indicated. It has been experimentally confirmed that the crack formation process is generally leveled. The main features and patterns of cracking in stretched reinforced concrete elements and structures are revealed. The main characteristics of the prototypes are given, according to the test results of which it was established that in practical calculations of the reinforced concrete elements crack resistance, it is usually possible to restrict oneself to two levels of normal cracking. For the indicated cracking levels, the corresponding load level, step and crack opening width are established. The expediency of using in practical calculations the nonlinear function of the reinforcement with concrete average adhesion stresses is also substantiated. Based on the studies results carried out, the existing methods for calculating the normal cracks formation and opening in reinforced concrete elements and structures were evaluated from the standpoint of local disadvantage of the reinforcement to concrete adhesion.

General and simplified methods for calculating normal cracks level formation and opening in reinforced concrete elements have been developed. In them, the direct integration of the expression for the concrete and reinforcement mutual displacements is proposed to be replaced not by the numerical integration of the indicated expression, but by the successive accumulation of the indicated displacements. Corresponding statistical comparisons of the calculations results by these methods with experimental data are carried out. The effectiveness of the developed methods for calculating normal cracks level formation and opening by comparing them with existing methods is estimated.

**Keywords:** reinforced concrete, elements, deformation, normal cracks, levels of cracking, step, opening width.

**Вступ.** Питання тріщиностійкості залізобетонних елементів і конструкцій завжди залишатимуться одними з визначальних у теорії залізобетону, оскільки процеси утворення та розвитку тріщин суттєво впливають на збереження їхніх експлуатаційних властивостей. До того ж запровадження в сучасну практику проектування деформаційних моделей опору

залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам дає можливість для більш точного відтворення реального напружено-деформованого стану вказаних елементів у процесі їх деформування.

Водночас загальновідомо, що утворення і розвиток тріщин у залізобетонних елементах є наслідком порушення зчеплення арматури з розтягнутим бетоном.

Однак побудова загальної методики розрахунку утворення та розкриття нормальних тріщин з безпосереднім залученням визначальних закономірностей зчеплення арматури з бетоном і досі стикається з серйозними труднощами. Зокрема розрахунок ширини розкриття нормальних тріщин за методикою Томаса, згідно з його знаменитою гіпотезою, у більшості випадків продовжує залишатися декларативним через значні труднощі прямого інтегрування виразу взаємних зміщень бетону і арматури. Обумовлено це тим, що дійсна залежність зчеплення арматури з бетоном є вкрай складною та не може бути описана якоюсь єдиною універсальною функцією.

Разом з тим методика розрахунку тріщиностійкості залізобетонних елементів у нормальних перерізах може бути суттєво спрощена. Для цього крок утворення тріщин і ширину їх розкриття необхідно пов'язати безпосередньо з зусиллями взаємодії арматури з бетоном на ділянці їхнього активного зчеплення та врахувати, що процес утворення тріщин зазвичай є дво-трирівневим. Безперечно, питання можливості та доцільності застосування такого підходу до розрахунку визначальних параметрів тріщиностійкості залізобетонних елементів і конструкцій потребують проведення спеціальних ґрунтовних досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дуже багато вітчизняних, а ще більше зарубіжних вчених присвятили свої численні дослідження питанням тріщиностійкості залізобетонних елементів і конструкцій. Тим не менше, лише окремі з них спрямовували свою увагу на виявлення загальних закономірностей поступового або рівневого утворення і розкриття нормальних тріщин і безпосередньо пов'язували їх зі зчепленням арматури з бетоном. Усі їхні дослідження можна умовно поділити на чотири групи.

До першої групи слід віднести ті дослідження, де вплив зчеплення арматури з

бетоном на послідовність утворення та розкриття нормальних тріщин пробують відтворювати за допомогою безпосереднього інтегрування діаграм взаємного зміщення бетону і арматури [1-4]. Оскільки було встановлено, що форма зазначених діаграм у процесі деформування залізобетонних елементів постійно змінюється [5-7], то подібне відтворення взаємодії арматури з бетоном у практичних розрахунках виявилось вкрай складним і навіть неможливим.

Роботи другої групи [8-12] зводяться до числових способів розрахунку рівневого утворення і розкриття нормальних тріщин, що реалізуються в рамках методу скінчених елементів за допомогою спеціальних програмних комплексів. Внаслідок цього інженерна осяжність і фізична сутність процесів зчеплення арматури з бетоном при утворенні тріщин у залізобетонному елементі доволі часто нівелюється або навіть втрачається.

До третьої групи слід віднести дослідження, які ґрунтуються на використанні спеціального «двоконсольного» елемента [13, 14]. Однак на сьогодні моделювання рівневого утворення нормальних тріщин за його допомогою залишається доволі складним і можливим лише за допомогою спеціальних комп'ютерних програм. Тут основні труднощі виникають з коректністю «виділення» або формування відповідного «двоконсольного» елемента.

Четверту групу складають роботи, у яких рівневе утворення нормальних тріщин моделюється за допомогою середніх напружень зчеплення арматури з бетоном [15-19]. З одного боку, цей спосіб є одним із найпростіших для реалізації в практичних розрахунках, з іншого – він не знімає питання щодо форми зв'язку між середніми значеннями напружень зчеплення арматури з бетоном і середніми значеннями нормальних напружень у самій арматурі, особливо на проміжних стадіях деформування залізобетонних елементів.

**Мета та задачі досліджень.** Дані дослідження спрямовані на формування та експериментально-теоретичне обґрунтування моделі рівневого утворення і розкриття нормальних тріщин у залізобетонних елементах. Для досягнення заявленої мети слід вирішити такі завдання:

- експериментально дослідити закономірності рівневого утворення та розкриття нормальних тріщин у розтягнутих елементах шляхом випробування призмових зразків;
- розрахувати за різними методиками теоретичну ширину розкриття нормальних тріщин при їх рівневому утворенні;
- виконати відповідні статистичні порівняння отриманих результатів розрахунку з дослідними даними та оцінити

ефективність різних способів урахування зчеплення арматури з бетоном у розрахунках тріщиностійкості залізобетонних елементів.

**Основна частина досліджень.** У роботі безпосереднє інтегрування виразу взаємних зміщень бетону і арматури пропонується замінити навіть не числовим інтегруванням зазначеного виразу, а послідовним накопиченням вказаних зміщень. Тому експериментально-теоретичні дослідження авторів зосереджені на вивченні реального механізму їх ступеневого накопичення. Пошук відповідних рішень розпочато з найпростішого випадку деформування залізобетонних елементів при утворенні в них тріщин. Для цього було виготовлено по три призмових зразки двох типів (рис. 1).

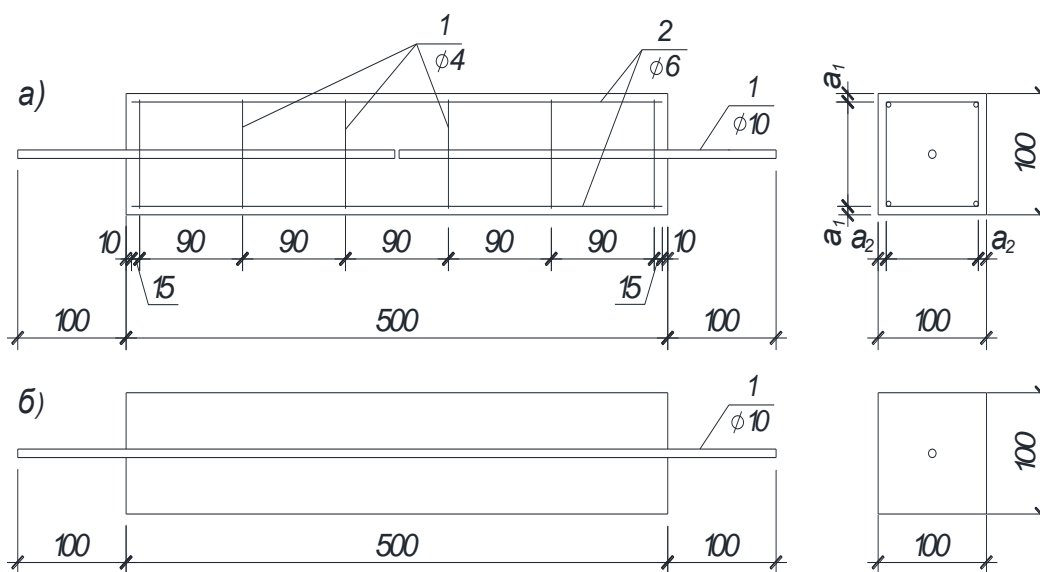


Рис. 1. Конструкція та схеми армування призмових зразків типу:  
а – ПАз; б – ПАр

У призмах типу ПАз центральний стрижень серпоподібного профілю  $\varnothing 10$  мм з арматури класу А500С був розрізаний посередині. Залізобетонна обійма навколо нього створювалася за допомогою просторового каркаса з чотирьох поздовжніх стрижнів гладкого профілю  $\varnothing 6$  мм класу

А240С і гнутих замкнених хомутив  $\varnothing 4$  мм класу Вр-І, розміщених з кроком 90 мм.

Усі призми типу ПАр армувалися лише одним центрально розташованим у поперечному перерізі елемента стрижнем  $\varnothing 10$  мм класу А500С. Слід зауважити, що в цих дослідженнях призмові зразки

розглядалися як фрагменти центрально розтягнутих елементів.

Експериментально встановлено, що утворення нормальних тріщин в обох випадках носило рівневий характер [20].

Тріщини першого рівня в призмах ПАЗ (рис. 2) утворювалися при навантаженнях  $N_{w,1} \approx 0,45N_{III}$ , починаючи від середини призми, де суміщались кінці розрізаного арматурного стрижня  $\varnothing 10$  мм А500С. Загалом же відстані між тріщинами цього рівня коливалися в достатньо широких межах – 120...250 мм. Утворення ж тріщин

другого рівня, відстань між якими зменшувалась до 70...120 мм, практично співпадало з початком проковзування гладких арматурних стрижнів  $\varnothing 6$  мм, що призводило до інтенсивного розкриття магістральних тріщин при навантаженнях  $N_{w,2} \approx (0,8...0,9)N_{III}$ . При цьому ставало помітним порушення зчеплення центрального арматурного стрижня  $\varnothing 10$  мм з бетоном, внаслідок чого з'являлися поздовжні тріщини на прикінцевих ділянках призмових зразків.

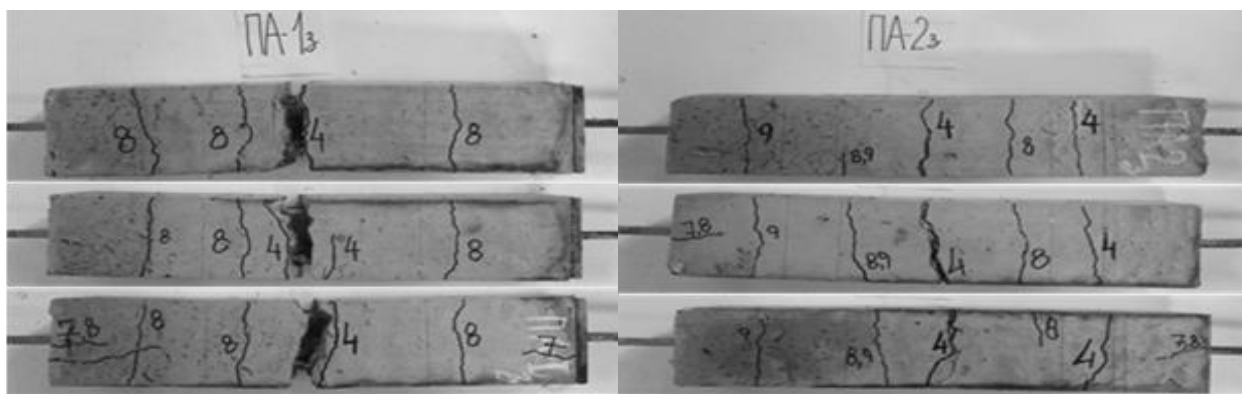


Рис. 2. Розгортки рівневого утворення і розвитку тріщин у призмах ПАЗ

У призмах ПАР (рис. 3) тріщини першого рівня почали з'являтися при навантаженнях  $N_{w,1} \approx 0,36N_{III}$ , тобто дещо раніше, ніж у призмових зразках ПАЗ, імовірно через відсутність обрамлювального просторового каркаса. Крок між тріщинами

цього рівня коливався в межах 170...250 мм. Тріщини другого рівня, відстань між якими зменшувалася теж практично вдвічі до 70...130 мм, утворювалися при навантаженнях, що були трохи більшими експлуатаційних  $N_{w,2} \approx (0,75...0,85)N_{III}$ .

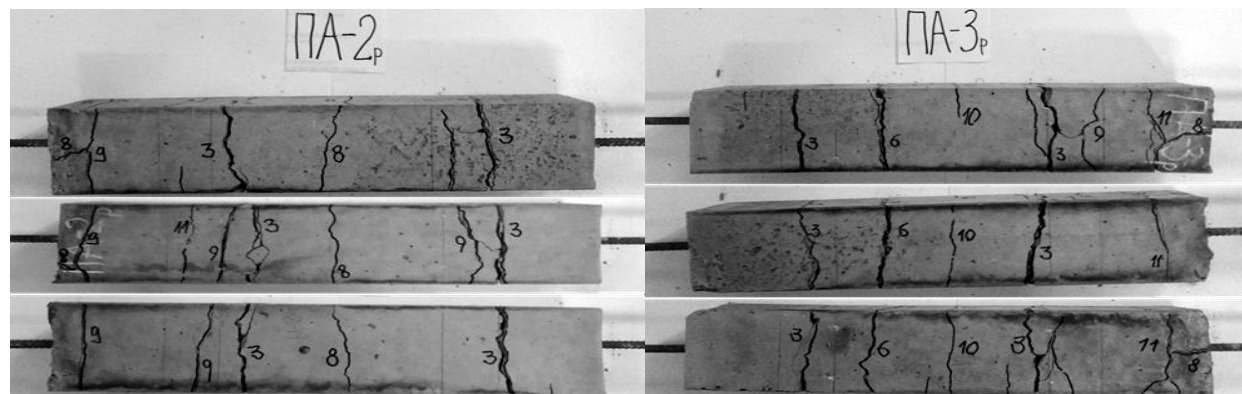


Рис. 3. Розгортки рівневого утворення і розвитку тріщин у призмах Пар



Для тріщин третього рівня характерним було те, що вони починали утворюватися при текучості арматури, і відстань між ними вже складала 40...80 мм. Практично з утворенням цих тріщин на прикінцевих ділянках вказаних призмових зразків з'являлись поздовжні тріщини, які свідчили про повне порушення зчеплення арматури з бетоном. При цьому утворення останніх супроводжувалося появою нових поперечних тріщин поблизу торця призм.

Експериментальні значення ширини розкриття нормальних тріщин у вищезгаданих призмах порівнювали з теоретичними значеннями, обчисленими за різними методиками (рис. 4 і 5, таблиця). Розрахунки виконувались за розробленими загальною [20] і спрощеною [20, 21] методиками, за методиками чинних норм [22, 23], СП [24] і за деформаційно-силовою моделлю [21] з використанням лінійної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном  $\tau_{bm}$  [15].

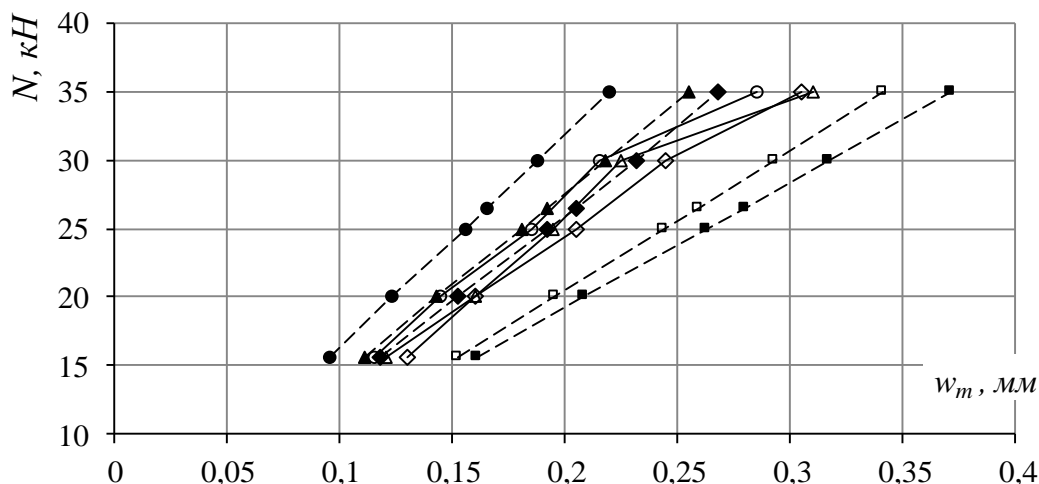


Рис. 4. Графіки розкриття тріщин: дослідні в призмах ○ – ПА-1з, ◇ – ПА-2з, △ – ПА-3з; теоретичні за методиками ■ – норм [22, 23]; □ – СП [24]; ● – ДСМ [21] з лінійними  $\tau_{bm}$  [15]; ◆ – загальною [20]; ▲ – спрощеною [20, 21]

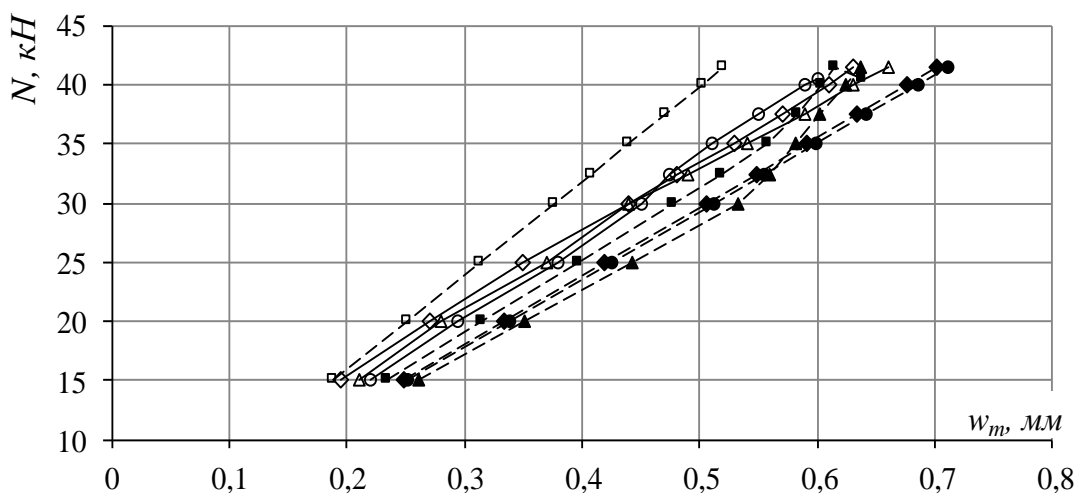


Рис. 5. Графіки розкриття тріщин: дослідні в призмах ○ – ПА-1р, △ – ПА-2р, ◇ – ПА-3р; теоретичні за методиками ◆ – норм [22, 23]; □ – СП [24]; ▲ – ДСМ [121] з лінійними  $\tau_{bm}$  [15]; ■ – загальною [20]; ● – спрощеною [20, 21]

Порівняння теоретичних та експериментальних значень ширини розкриття нормальних тріщин

Методика розрахунку	Відхилення від дослідних даних		Коефіцієнт варіації $\nu$ , %
	середньо арифметичне $\Delta$ , %	середньо квадратичне $\sigma$ , %	
норм [22, 23]	33,25/13,93	8,29/4,69	6,22/4,11
СП [24]	17,75/14,85	12,79/3,98	10,87/4,67
ДСМ [21] і лінійних напружень $\tau_{bm}$ [15]	21,2/14,24	4,9/9,92	6,22/8,69
загальна [20]	3,05/7,32	6,3/4,74	6,5/4,41
спрощена [20, 21]	9,14/15,47	5,69/4,78	6,22/4,14

**Висновки.** Завдяки результатам проведених досліджень вдалося:

– виявити особливості та основні закономірності утворення, розвитку і розкриття нормальних тріщин у розтягнутих залізобетонних елементах і конструкціях;

– підтвердити, що процес утворення тріщин у залізобетонних елементах у дійсності є багаторівневим;

– встановити, що в більшості випадків при розрахунку залізобетонних елементів за тріщиностійкістю можна обмежуватися лише одним-двома рівнями утворення тріщин;

– обґрунтувати доцільність використання в практичних розрахунках нелінійної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном;

– підтвердити можливість визначення ширини розкриття нормальних тріщин через послідовне накопичення взаємних зміщень бетону і арматури без прямого інтегрування виразу вказаних зміщень;

– оцінити ефективність розроблених методів розрахунку рівневого утворення та розкриття нормальних тріщин через їх порівняння з уже існуючими методами.

#### Список використаних джерел

1. Alvarez M. Einfluss des Verbundverhaltens auf das Verformungsvermögen von Stahlbeton: Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der Technischen Wissenschaften. Zürich: Eidgenössischen Technischen Hochschule, 1998. 189 p.
2. Ruiz M. R., Hars E., Muttoni A. Bond mechanics in structural concrete. Theoretical model and experimental results. Lausanne: IS-BETON, EPFL, 2005. 75 p.
3. Майоров В. И., Кузьмин П. К. От условной к точной модели расчета трещиностойкости железобетонных сечений. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2011. № 2. С. 22-28.
4. Рудный И. А. Трещиностойкость растянутых и изгибаемых железобетонных элементов с участками нарушенного сцепления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Санкт-Петербург, 2015. 22 с.

5. Eligehausen R., Popov E. P. and Bertero V. V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: Report No. UCB/EERC-83/23. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center of California University, 1983. 169 p.
6. Shima H., Chou L.-L. and Okamura H. Micro and macro models for bond in reinforced concrete. *Journal of the Engineering Faculty of Tokyo University*. 1987. Vol. XXXIX, No. 2. P. 133-194.
7. Harajli M. H., Hout M. A. and Jalkh W. Local bond stress-slip behavior of reinforced bars embedded in plain and fiber concrete. *ACI Materials Journal*. 1995. Vol. 92, No. 4. P. 343-353. (SCOPUS).
8. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. Москва: Стройиздат, 1996. 416 с.
9. Веселов А. А. Нелинейная теория сцепления арматуры с бетоном и ее приложения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Санкт-Петербург, 2000. 44 с.
10. Бенин А. В., Семёнов А. С., Семёнов С. Г., Мельников Б. Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения. *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 5(40). С. 86-99.
11. Бенин А. В., Семенов А. С., Семенов С. Г., Мельников Б. Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения. *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 1(45). С. 23-40.
12. Shardakov I. N., Bykov A. A., Shestakov A. P., Glot I. O. Process of cracking in reinforced concrete beams: simulation and experiment. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 38. P. 339-350. (SCOPUS).
13. Колчунов В. И., Яковенко И. А. Разработка двухконсольного элемента механики разрушения для расчета ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций. *Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ*. 2009. № 4(21). С. 160-163.
14. Яковенко І. А. Моделі деформування залізобетону на засадах механіки руйнування: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2018. 44 с.
15. Кочкаръов Д. В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2018. 43 с.
16. Romashko O., Romashko V. Evaluation of bond between reinforcement and concrete. *MATEC Web of Conf*. 2018. Vol. 230. 02027. (SCOPUS).
17. Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин. Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 181. С. 58-65.
18. Romashko O. V. and Romashko V. M. Model of multilevel formation of normal cracks in reinforced concrete elements and structures. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. 012069. (SCOPUS).
19. 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).
20. Ромашко-Майструк О. В. Опір залізобетонних елементів багаторівневному утворенню нормальних тріщин: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Рівне, 2021. 217 с.
21. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.
22. 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.
23. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, December 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p.

24. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. [Введен 01.01.2013]. Москва: Минрегион России, 2013. 155 с.

---

Ромашко-Майстрок Олена Василівна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природо-користування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com. Ромашко Василь Миколайович, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природо-користування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3448-7489. Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Romashko-Maistruk Olena Vasylivna, PhD. (Tech.), Senior Lecturer at the Department of Industrial, Civil Construction and Engineering Structures National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com. Romashko Vasylyl Mykolayovych, D. Sc. (Tech.), associate professor, head of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3448-7489. Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Статтю прийнято 11.08.2021 р.

УДК 666.914:661.21

## КОРОЗИЙНОСТІЙКИЙ ОБЛИЦЮВАЛЬНИЙ МАТЕРІАЛ З МІНЕРАЛЬНОЇ В'ЯЖУЧОЇ РЕЧОВИНИ І ЗОЛИ-ВИНОСУ, МОДИФІКОВАНИЙ РОЗПЛАВОМ СІРКИ

Кандидати техн. наук В. І. Тарасевич, Ю. Г. Гасан

### CORROSION-RESISTANT FACING MATERIAL WITH OF MINERAL BINDERS AND ASSETS MODIFIED BY SULFUR MELT

PhD (Tech.) V. Tarasevych, PhD (Tech.) Y. Gasan

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248138>

*Анотація.* У роботі розглянуто питання отримання композиційного матеріалу на основі гіпсової в'язучої речовини або інших в'язучих речовин і сірки з підвищеними експлуатаційними характеристиками виробів з них. Досліджено технологічні фактори, які впливають на коефіцієнт зміцнення, водостійкість і хімічну стійкість гіпсозольних виробів, просочених у розплаві сірки. Встановлено закономірності просочення гіпсозольної матриці розплавом сірки з урахуванням капілярно-пористої структури гіпсозольного каменю і фізико-технічних властивостей сірки. Одержаний сіркогіпсовий композит відрізняється високою міцністю, водо- і корозійною стійкістю до агресивних середовищ підприємств харчової і хімічної промисловості, об'єктів залізничної інфраструктури, де його слід використовувати у вигляді спеціальних облицювальних виробів.

*Ключові слова:* гіпсове в'язуче, зола, розплав сірки, капілярне просочування, водостійкість, хімічна стійкість.

*Abstract.* The paper considers the issues of obtaining a composite material based on gypsum binder and sulfur with high performance. Technological factors influencing the hardening coefficient,

*water resistance and chemical resistance of gypsum products impregnated in sulfur melt have been studied. The regularities of impregnation of gypsum matrix with sulfur melt are established taking into account the capillary-porous structure of gypsum stone and physical and technical properties of sulfur. The regularities of impregnation of gypsum matrix with sulfur melt are established taking into account the capillary-porous structure of gypsum stone and physical and technical properties of sulfur. Research and consideration of mass transfer indicators during impregnation of gypsum concrete products with sulfur melt allowed to optimize the technology. Thus, by the method of capillary impregnation on the original laboratory installation, the mass transfer coefficients for sulfur were measured. As a result of these studies, the dependences of the mass transfer coefficient on the temperature of the sulfur melt, the rate of heating of the melt, the concentration of the filler and the water-solid ratio were obtained. Products made of composite material based on gypsum and sulfur have the following construction and technical characteristics: compressive strength, not less than 30.0 MPa; flexural strength, not less than 6.0 MPa; water resistance coefficient, not less than 0.7; coefficient of corrosion resistance, not less than 0.7; wear resistance, no more than 0.3 g / cm<sup>2</sup>. Analysis of the main construction and technical characteristics of the composite material based on gypsum and sulfur shows that the resulting composite has high strength, water and corrosion resistance to various aggressive environments. Facing tiles made of this material have high performance characteristics and should be used in the lining of buildings of railway infrastructure, drainage systems, fertilizer storage, floors and walls of the chemical and food industries.*

**Keywords:** *gypsum binder, ash, sulfur melt, capillary impregnation, water resistance, chemical resistance.*

**Вступ.** Елементи залізничних тунелів завжди працюють в умовах дії на них ґрунтових вод, насичених різними агресивними сполуками, які здатні викликати хімічну або електрохімічну корозію та посилюються дією повітря в тунелях, насиченого вихлопними газами, що викидають потяги. Захист елементів споруд залізничної інфраструктури, і тунелів зокрема, від дії агресивних середовищ залишається актуальним завданням (проблемою).

Ефективним способом підвищення водостійкості й покращення інших будівельно-технічних властивостей капілярно-пористих будівельних матеріалів, зокрема й на основі гіпсу, є їх просочення речовинами, здатними тверднути в поровому просторі цих матеріалів, що сприяє ущільненню структури й перешкоджає проникненню в них вологи.

Оптимальною просочувальною речовиною для модифікації гіпсобетонів є сірка. Відомо, що сірка – це типовий неорганічний термопласт, здатний до утворення численних алотропних модифікацій, і при цьому в розплавленому стані вона має

невелику в'язкість. Сірка добре сумісна з різними полімерними модифікаторами. Вводячи різні добавки, можна регулювати в'язкість і поверхневий натяг у широких межах. Сірка має сильні адгезійні зв'язки до мінеральних наповнювачів і заповнювачів. При нормальних умовах вона хімічно інертна. Навіть при нагріванні практично нерозчинна у воді й кислотах. Сірка діаманітна, є поганим провідником тепла, має інсектицидні властивості, гідрофобна, має низьку температуру плавлення, що дозволяє при невеликих енерговитратах переводити її з твердого стану в рідкий. З технологічної точки зору, процес кристалізації розплаву сірки при охолодженні є більш простим, ніж полімеризація мономерів при виготовленні бетонополімерів [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні відомо кілька технологічних прийомів отримання будівельних матеріалів і виробів із застосуванням сірки різних модифікацій. Одним з них є просочення традиційних будівельних матеріалів і виробів розплавом сірки, іншим – виготовлення сірчаних

бетонів. Відома властивість розплаву сірки утворювати сильні адгезійні зв'язки з різними мінеральними наповнювачами дозволяє використовувати сірку як основу сірчаного зв'язуючого – мастики, яка у свою чергу є основою структури сірчаніх бетонів [3].

Найважливішим компонентом структури мастики є наповнювач, введення якого знижує витрати сірки і сприяє зміні структури і всіх властивостей сірчаної мастики [4]. Однією з найбільш цінних властивостей композиційних матеріалів на основі сірки є їхня висока корозійна стійкість. У ряді робіт відзначається, що сірчаний бетон стійкий до впливу різних кислот.

Однак у цих роботах не досліджено питання, пов'язані з фізико-хімічними явищами, що протікають при взаємодії гіпсової або гіпсозольної матриці й сірки, стійкістю просочених зразків в агресивних середовищах, і недостатньо розглянуто процеси сушіння й просочення з точки зору їх оптимізації.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета роботи полягає в тому, щоб розглянути питання отримання композиційного матеріалу на основі гіпсу й сірки з підвищеними будівельно-технічними властивостями, встановити закономірності просочення гіпсозольної матриці розплавом сірки з урахуванням капілярно-пористої структури і визначити

фізико-технічні властивості модифікованих матеріалів.

**Основна частина дослідження.** З метою оптимізації технології приготування розплаву сірки були проведені експерименти з дослідження впливу температурної передісторії і температури розплаву сірки на коефіцієнт масопереносу сірки. Кінетику капілярного просочення знімали при температурах розплаву сірки 125, 140 і 155 °С, потім нагрівали розплав сірки до температури 170 °С, при цьому в'язкість розплаву сірки значно зростала через розрив кільцевих молекул S<sub>8</sub> і з'єднання їх у довгі ланцюги. При охолодженні розплаву сірки знімали кінетику капілярного просочення при тих самих фіксованих температурах розплаву (125, 140 і 155 °С). Результати експерименту подано на рис. 1. Аналіз результатів показав, що при збільшенні температури розплаву сірки до 155 °С коефіцієнт масопереносу сірки  $a_{ms}$  зростає. Це пояснюється алотропними перетвореннями сірки.

З графіка рис. 1 видно наявність температурного гістерезису коефіцієнта масопереносу сірки  $a_{ms}$ . Наявність температурного гістерезису коефіцієнта  $a_{ms}$  дозволяє оптимізувати процес приготування розплаву сірки, оскільки можна застосовувати інтенсивний нагрів сірки, не побоюючись перегріву розплаву вище 160 °С, і отримати розплави з ефективними просочувальними властивостями.

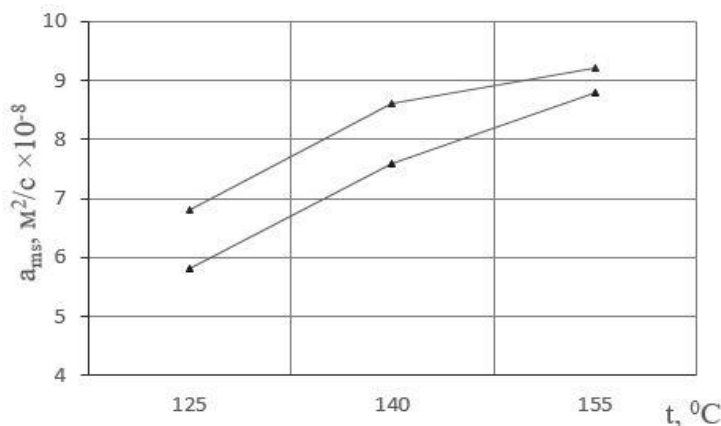


Рис. 1. Залежність коефіцієнта масопереносу  $a_{ms}$  від температури розплаву сірки

Результати досліджень впливу концентрації наповнювача і водов'язучого відношення на коефіцієнт масопереносу  $a_{ms}$  і максимальний сірковміст  $U_s$  показано на рис. 2. Кількісний аналіз результатів експериментів показав, що зі збільшенням концентрації наповнювача коефіцієнт  $a_{ms}$  і

$U_s$  зменшуються, а при збільшенні водов'язучого відношення – зростають. Це пов'язано з тим, що при збільшенні концентрації наповнювача зменшуються пористість і середній радіус пор, а при збільшенні водов'язучого відношення ці величини відповідно зростають.

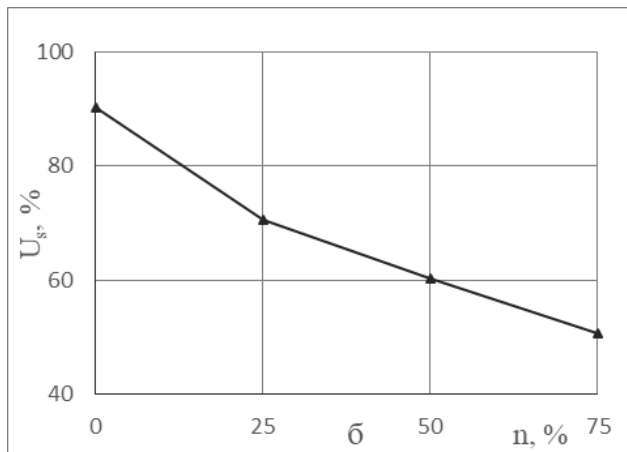
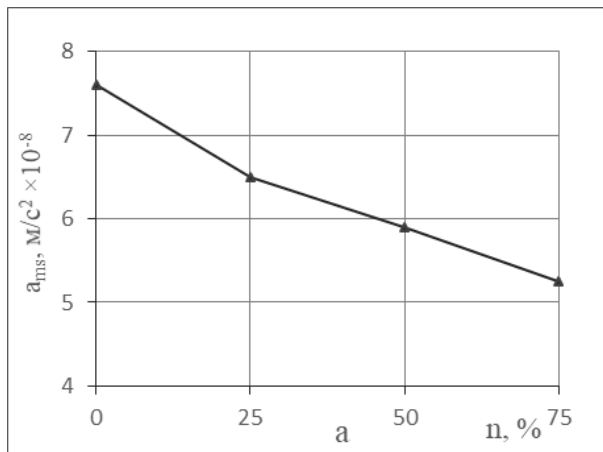


Рис. 2. Залежність коефіцієнта масопереносу  $a_{ms}$  (а) і вмісту сірки  $U_s$  (б) у гіпсозольних зразках від вмісту золи-виносу

Таким чином, проведені дослідження дозволяють визначати коефіцієнт масопереносу сірки  $a_{ms}$  і максимальний сірковміст  $U_s$  в просочених виробках залежно від вихідних значень температури розплаву сірки, водов'язучого відношення і вмісту золи-виносу. Це дає можливість для конкретного складу і розміру гіпсозольних виробів ефективно й оперативно визначати тривалість просочення до заданого вмісту сірки.

Оцінювання ефективності просочення зразків здійснювали за коефіцієнтом зміцнення ( $K_y$ ), який визначали як співвідношення міцності зразка після просочення до вихідного.

Результати дослідження впливу водогіпсового відношення і вмісту сірки у просочених гіпсових зразках на міцність і коефіцієнт зміцнення подані в табл. 1. і на рис. 3.

Таблиця 1  
Вплив водогіпсового відношення на міцність гіпсового каменю, просоченого розплавом сірки

В/Г	Пористість, %	$U_s, \%$	$R_{ст}, МПа$	$R_{зг}, МПа$	$K_y(R_{ст})$	$K_y(R_{зг})$
0,45	50,0	71,2	34,1	10,5	4,7	5,0
0,50	53,2	83,5	38,0	10,8	6,5	6,7
0,55	55,8	90,8	42,4	12,5	8,3	8,8
0,60	58,4	97,1	42,8	12,1	9,4	9,8
0,65	60,7	100,0	40,2	11,8	10,2	11,2
0,70	63,1	100,2	36,5	10,2	10,6	12,5

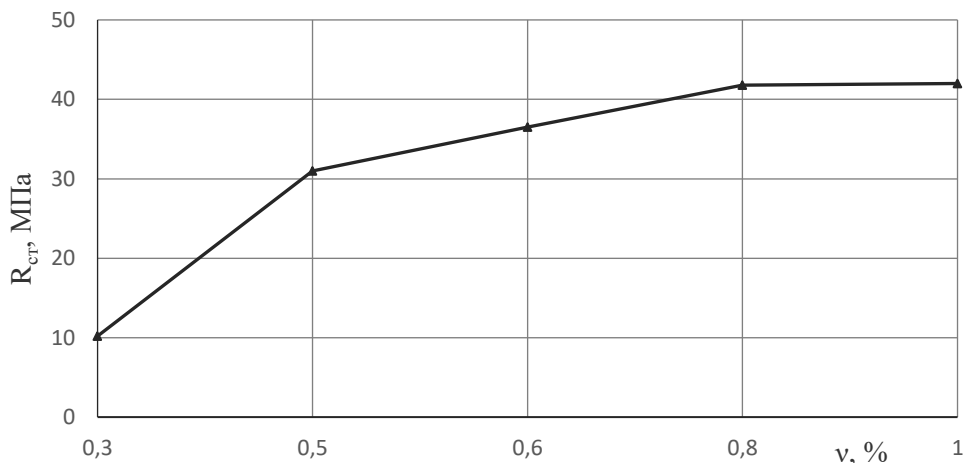


Рис. 3. Залежність межі міцності при стиску просоченого гіпсового каменю від співвідносного вмісту сірки

$$v = U_s / U_{smax}$$

Аналіз результатів, наведених на рис. 3, показує, що міцність просочених зразків підвищується зі збільшенням ступеня заповнення порового простору сіркою. Так, при збільшенні відносного сірковмісту ( $v = U_s / U_{smax}$ ) від 0,30 до 0,90 межа міцності при стиску підвищується від 10,1 до 42 МПа.

Значне збільшення міцності гіпсових зразків у результаті просочення сіркою пов'язане з тим, що висока пористість гіпсового каменю, що ще збільшується за рахунок видалення частини кристалогідратної води, дозволяє створити при просоченні неперервний сірчаний каркас. Утворення сірчаного каркаса з дрібнокристалічною структурою сірки обумовлює високу міцність отриманого композиційного матеріалу.

Аналіз даних, наведених у табл. 1, показує, що коефіцієнт зміцнення просочених гіпсових зразків підвищується при збільшенні водов'язучого співвідношення. Так, при збільшенні В/Г від 0,45 до 0,70 коефіцієнт зміцнення при стиску зростає від 4,7 до 10,6, а при згині – від 5,0 до 12,1. Така залежність пояснюється тим, що при підвищенні водов'язучого співвідношення збільшується пористість каменю в'язучого, що дозволяє при просоченні одержати більш міцний сірчаний каркас. У результаті цього

підвищується міцність просочених зразків. Однак, при підвищенні водов'язучого співвідношення збільшується кількість пор розміром понад 0,2 мм, які частково кольматуються сіркою, що призводить до зниження міцності сірчаного каркаса. Цим можна пояснити деяке зниження (в 1,17 разу) міцності просочених зразків при збільшенні В/В від 0,60 до 0,70, але при цьому міцність вихідного непросоченого зразка знижується в 1,3 разу, що й обумовлює збільшення коефіцієнта зміцнення.

Після просочення сіркою гіпсова матриця багато в чому втрачає свої властивості і роль каркаса, оскільки при дегідратації вона значно знижує і без того невисоку міцність. У підсумку одержуваний сіркогіпсовий матеріал можна називати композиційним матеріалом із проміжною (допоміжною) матрицею.

Експерименти показали (рис. 4), що міцність просочених зразків знижується при збільшенні вмісту золи-виносу. Це обумовлено тим, що при збільшенні кількості золи-виносу зменшується пористість і, як наслідок, знижується максимальний вміст сірки в просочених зразках. Однак при збільшенні вмісту золи-виносу коефіцієнт зміцнення зростає. Це пов'язано з тим, що при збільшенні кількості золи-виносу міцність вихідного



непросоченого зразка знижується швидше, ніж у просоченого.

Збільшення вмісту полімерної сірки в просочених зразках сприяє підвищенню

їхньої міцності за рахунок зниження внутрішніх напружень і утворення більш міцних адгезійних зв'язків сірки з гіпсозольним каменем.

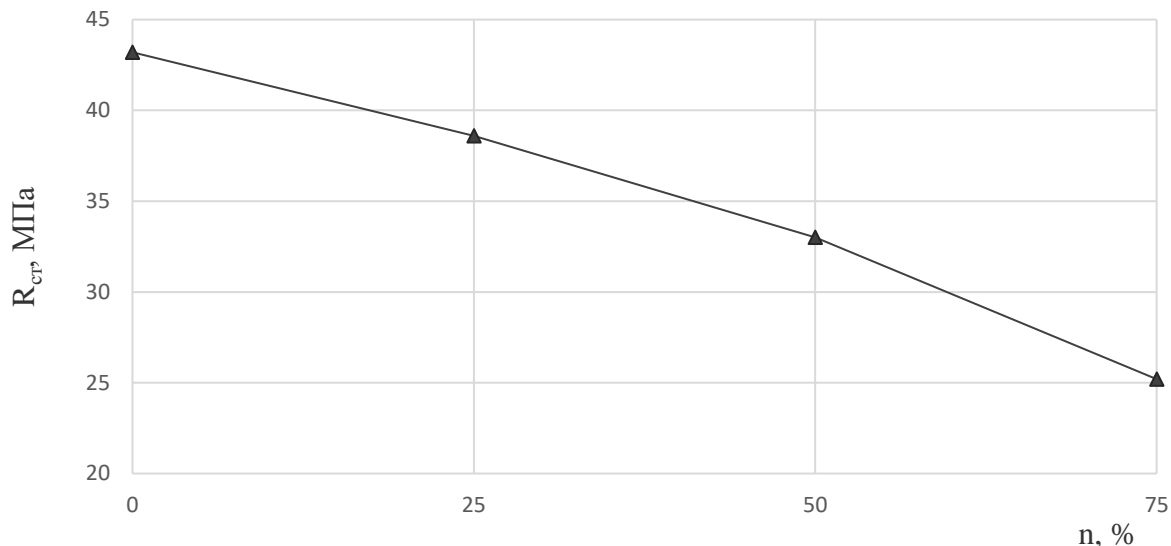


Рис. 4. Залежність межі міцності при стиску просоченого гіпсозольного каменю від вмісту золи-виносу

З метою визначення сфери раціонального використання виробів з композиційного матеріалу на основі в'язучої речовини і сірки в будівництві були проведені дослідження їхньої водостійкості й хімічної стійкості.

Результати дослідження водостійкості просочених сіркою зразків при варіюванні вмісту золи-виносу та відносного сірковмісту наведено в табл. 2.

Аналіз даних показує, що водостійкість просочених зразків істотно залежить від ступеня просочення і кількості золи-виносу. Так, при частковому просоченні гіпсових зразків коефіцієнт водостійкості складає 0,50, у той час як при повній – 0,72. При збільшенні вмісту золи-виносу до 75 % коефіцієнт водостійкості зростає до 0,88. Це зумовлено, по-перше, більш щільною структурою просочуваного гіпсозольного каменю.

Таблиця 2

Залежність коефіцієнта водостійкості від складу просочених зразків

Склад зразка			Відносний вміст сірки	Коефіцієнт водостійкості
гіпс, %	зола-винос, %	В/Т		
100	0	0,55	0,75	0,50
			1,00	0,72
75	25	0,48	0,75	0,58
			1,00	0,78
50	50	0,41	0,75	0,64
			1,00	0,85
25	75	0,34	0,75	0,68
			1,00	0,88

По-друге, при збільшенні вмісту золи-виносу зменшується відносний вміст водорозчинних міжкристалічних контактів гіпсу [5]. І, по-третє, при просоченні гіпсозольних виробів, особливо при високому вмісті золи-виносу, розплав сірки, заповнюючи міжзерновий простір золи-виносу, зв'язує зерна, оскільки між сіркою та золою-виносу виникають сильні адгезійні зв'язки. У результаті утворюється матриця з водостійкого матеріалу на зразок сірчаної мастики, яка, як відомо з роботи [2], має високу водостійкість (0,92).

Проведені експерименти дають підставу вважати, що композиційний матеріал на основі гіпсу, золи і сірки належить до водостійких матеріалів, оскільки коефіцієнт водостійкості вище 0,7. Тому можна прогнозувати, що облицювальні вироби з такого матеріалу будуть мати високу довговічність.

Відомо, що хімічна стійкість матеріалу залежить переважно від його проникності і реакційної здатності компонентів матеріалу до впливу агресивних середовищ. Як встановлено, просочення гіпсозольних зразків сіркою значно знижує їхню загальну пористість, що дозволяє істотно знизити проникність гіпсозольної матриці, і тому можна прогнозувати зниження потенційної агресивності середовища [6, 7]. Хімічну стійкість просочених зразків визначали в розчинах сірчанокислого магнію, сірчаної, оцтової і щавлевої кислот, які є найбільш характерними компонентами агресивних середовищ тваринницьких приміщень, підприємств хімічної та харчової промисловості. Результати випробувань зразків після шестимісячного витримання в названих середовищах наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Вплив вмісту золи і сірки на хімічну стійкість сіркогіпсового композита

Склад зразка		U <sub>s</sub> , %	Коефіцієнт хімічної стійкості (K <sub>х.с.</sub> )			
Гіпс, %	Зола-винос, %		Оцтова кислота	Щавлева кислота	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>
100	0	92.0	0.71	0.71	0.70	0.70
75	25	74.2	0.76	0.78	0.75	0.75
50	50	61.4	0.84	0.84	0.83	0.84
25	75	54.0	0.88	0.88	0.88	0.88

Встановлено, що гіпсові і гіпсозольні зразки, просочені розплавом сірки, мають коефіцієнт хімічної стійкості не менше 0,7. Це дозволяє віднести їх до хімічно стійких у цих середовищах.

Таким чином, встановлено, що величина коефіцієнта зміцнення зростає при збільшенні кількості поглиненої сірки, вмісту золи-виносу та водов'язучого відношення. Показана позитивна роль золи-виносу в підвищенні водостійкості (K<sub>в.с.</sub> > 0,8) і хімічної стійкості (K<sub>х.с.</sub> > 0,8) просоченого гіпсозольного каменю за рахунок зменшення відносного вмісту водорозчинних контактів гіпсу і утворення

матриці з сіркозольного матеріалу на зразок сірчаної мастики [8-10].

Проведеними дослідженнями встановлено, що вироби з композиційного матеріалу на основі гіпсу й сірки не включають до свого складу потенційно небезпечні для організму людини й навколишнього середовища сполуки; є хімічно стабільними і не виділяють у повітряне, водне та кислотне середовища нестабільних неорганічних сполук. За висновком Головного санітарного лікаря України, композиційний матеріал на основі гіпсу і сірки рекомендується при будівництві будівель груп «Б» і «В» (промислові і громадські будівлі) [11].

**Висновки.** На підставі проведених досліджень встановлено закономірності просочення матриці на основі мінеральної в'язучої речовини і золи розплавом сірки, які дозволяють реалізувати композит, утворений двома адгезійно пов'язаними безперервними підструктурами – оптимізовано-пористої штучного каменю і аморфно-кристалічної сірчаної.

Аналіз основних будівельно-технічних характеристик матеріалу на

основі мінеральної в'язучої речовини, золи і сірки показує, що облицювальні вироби, виготовлені з такого матеріалу, мають високі експлуатаційні характеристики і їх доцільно застосовувати для облицювання будівель залізничної інфраструктури, сховищ добрив, дренажних систем, підлог і стін тваринницьких комплексів, підприємств хімічної і харчової промисловості.

### Список використаних джерел

1. Менковский М. А., Яворский В. Т. Технология серы. Москва: Химия, 1985. 328 с.
2. Патуров В. В., Волгушев А. Н., Орловский Ю. И. Серные бетоны и бетоны, пропитанные серой. *Строительные материалы*. Сер. 7. Вып. 1. Москва: ВНИИИС Госстроя СССР, 1985. 60 с.
3. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. Модифицированные высококачественные бетоны. Москва: АСВ, 2006. 368 с.
4. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Специальные бетоны. Москва: Инфра-Инженерия, 2012. 368 с.
5. Гасан Ю. Г., Тарасевич В. И., Кучерова Г. В., Сергієнко О. В. Модифікація і дослідження композиційних матеріалів на основі гіпсової в'язучої речовини з високим вмістом золи виносення ТЕС. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2015. Вип. 57. С. 53-57.
6. Гасан Ю. Г., Тарасевич В. И. Химически стойкий облицовочный материал из гипсобетона, пропитанного серой. *Докл. I Межгосударст. семинара «Проблемы огнезащиты строительных материалов и конструкций»*. Львов, 1994. С. 202–206.
7. Vlahovic M. M., Martinovic S. P., Boljanac T. D., Jovanic P. B., Volkov-Husovic T. D. Durability of sulfur concrete in various aggressive environments. *Constr. Build. Mater.* 2011. 25. 3926–3934.
8. Mohamed A.-M.O., El Gamal M. Hydro-mechanical behavior of a newly developed sulfur polymer concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2009. 31. P. 186–194.
9. Frolova I., Tikhonov V. V., Poltoranina A. P., Usoltseva N., Fu S.C., Knyazev A. S. Sulfur-containing composite material for the concrete production. *Key Eng. Mater.* 2016. 712. P. 171–175.
10. El Gamal M. M., El-Dieb A. S., Mohamed A.-M.O., El Sawy K. M. Performance of modified sulfur concrete exposed to actual sewerage environment with variable temperature, humidity and gases. *J. Build. Eng.* 2017. 11. P. 1–8.
11. Гасан Ю. Г., Тарасевич В. И., Долгошей В. Б. Исследование токсикологической безопасности производства и эксплуатации изделий из серогипсового композита. *Кераміка. Наука і життя*. 2019. №2 (43). С. 15–17.

---

Тарасевич Віталій Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID: 0000-0002-3249-7029. Тел.: (097) 5149960. E-mail: vittars@ukr.net.

Гасан Юрій Гусейнович, кандидат технічних наук, професор кафедри будівельних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID: 0000-0002-2510-4418. Тел.: (068) 3785210. E-mail: gasan.iug@knuba.edu.ua.

Tarasevych V.I., PhD., Assistant Professor of the Department of Physics of Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID: 0000-0002-3249-7029. Тел.: (097) 5149960. E-mail: vittars@ukr.net.

Gasas Yu.G., PhD, Professor of the Department of Technology of Building Structures and Products of Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID: 0000-0002-2510-4418. Тел.: (068) 3785210. E-mail: gasan.iug@knuba.edu.ua.

Статтю прийнято 02.09.2021 р.

УДК 691.32

## НАДШВИДКЕ ОТРИМАННЯ ПЕРЕДАТОЧНОЇ МІЦНОСТІ БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСНИХ ДОБАВОК

Д-р техн. наук А. А. Пługін, асп. О. В. Калюжна, кандидати техн. наук О. С. Борзяк,  
О. А. Пługін, асп. О. М. Савченко

## ULTRAFAST TRANSFER STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE SLEEPERS BY USING COMPLEX ADDITIVES

D. Sc. (Tech.) A. Plugin, postgraduate student O. Kaliuzhna, PhD (Tech.) O. Borziak,  
PhD (Tech.) O. Pluhin, postgraduate student O. Savchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248243>

***Анотація.** Досліджено вплив добавок суперпластифікаторів-полікарбоксилатів та їх комплексних добавок з прискорювачами – електролітами та дисперсією гідросилікатів кальцію на ранню міцність бетону залізобетонних шпал. Встановлено, що застосування суперпластифікаторів-полікарбоксилатів дає змогу підвищити ранню міцність бетону після тепловологісної обробки, проте кожену добавку необхідно перевіряти на сумісність із застосованим цементом. Їх комплексні з прискорювачами добавки в умовах природного твердіння забезпечують підвищення ранньої міцності бетону, проте деякі з них, що прискорюють природне твердіння, можуть знизити міцність після ТВО і мають перед застосуванням перевірятись. Проведено електронно-мікроскопічні дослідження структури цементного каменю з добавками, встановлено, що добавка лише полікарбоксилату майже не змінює структуру продуктів гідратації. Комплексні добавки призводять до утворення додаткової кількості кристалогідратів AFm- та/або AFt-фаз. Розроблено схему розвитку процесу тужавлення і початкової стадії твердіння цементу без добавок або з добавками, за допомогою яких встановлений експериментальними дослідженнями найбільший прискорюючий ефект комплексної добавки полікарбоксилату та дисперсії гідросилікатів кальцію пояснено тим, що частинки дисперсії збільшують площу поверхонь, на яких відбувається кристалізація (конденсація) продуктів гідратації цементу, та забезпечують більші швидке заповнення ними прошарків між частинками цементу (мінеральних добавок, заповнювачів) з утворенням ланцюжків з електрогетерогенними контактами. В результаті потенціодинамічних та мікроскопічних досліджень встановлено, що добавки у досліджених дозуваннях не спричиняють корозійного впливу на сталеву арматуру. Досягнуто величини передаточної міцності 32 МПа для шпал через 24 год твердіння за малопрогрівним режимом*

і через 2 доби природного твердіння. Запропоновано формулу економічної ефективності використання добавок для зниження енергоємності виробництва залізобетонних шпал.

**Ключові слова:** залізобетонна шпала, бетон, рання міцність, хімічні та мінеральні добавки.

**Abstract.** *The influence of superplasticizers-polycarboxylates and their complex additives with accelerants - electrolytes and dispersion of calcium hydroxylates on the early strength of concrete for concrete of concrete sleepers has been studied. It was found that the use of superplasticizers-polycarboxylates can improve the early strength of the concrete after heat treatment, but each additive must be checked for consistency with the cement used. Approx Complex additives with accelerators in conditions of natural hardening ensure an increase in the early strength of concrete, but some of them, which accelerate natural hardening, can reduce the strength after WWTP and must be checked before use. Electron-microscopic examinations of the structure of cement stone with additives were carried out and it was found that the additive of only polycarboxylate does not change the structure of hydration products. Complex additives lead to formation of additional number of crystalline hydrates of AFm- and/or AFt-phases. The scheme of development of the cement hardening process and the initial stage of cement hardening without or with additives has been developed. By means of which the highest accelerating effect of the complex addition of polycarboxylate and calcium hydroxylate dispersions was established by experimental investigations, Dispersion particles increase surface area where crystallization (condensation) of cement hydration products takes place and ensures faster filling of spaces between cement particles (mineral additives) with them, fillers) with establishment of lances with electro-heterogeneous contacts. As a result of potentiodynamic and microscopic investigations it was established that the tested additives in the dosages do not cause corrosion effect on the steel reinforcement bars. Transmission strength values of 32 MPa for sleepers after 24 years of hardening under low-heat regime and after 2 days of natural hardening have been achieved. The formula for economic efficiency of using additives to reduce the energy intensity of production of concrete sleepers has been proposed.*

**Keywords:** reinforced concrete sleeper, concrete, early strength, chemical and mineral additives.

**Вступ.** Станом на 01.01.2021 розгорнута довжина колій залізниць загального користування в Україні сягала 27062,3 км, з яких 23902,0 км укладено на залізобетонних шпалах, яких нараховується 44304,8 тис. шт. Оскільки масова заміна дерев'яних шпал залізобетонними завершена ще у 1990-х рр. і нові шпали виробляються лише для капітального ремонту колій високих категорій, їх виробництво сьогодні здійснюється в менших обсягах, ніж проектна потужність наявних заводів. Нині шпали виробляються переважно трьома підприємствами: ПрАТ «Гніванський завод спецзалізобетону» (Гніванський ЗСЗБ), ПрАТ «Коростенський завод залізобетонних шпал» (Коростенський ЗЗБШ) та філією

«Старокостянтинівський завод залізобетонних шпал» АТ «Укрзалізниця». До 2010-х років значна кількість шпал вироблялась ще й ВАТ «Кременчуцький завод залізобетонних шпал» (Кременчуцький ЗЗБШ).

Шпали виробляють армованими пакетами із 44 шт. попередньо напруженого високоміцного дроту Ø3 мм і з бетону класу С32/40. Витрати цементу до 2010-х років перевищували 400 кг на метр кубічний. Шпали формують вібраційним способом у силових формах, на які перед заповненням бетонною сумішшю натягують арматурний пакет. Найбільші виробники – Гніванський ЗСЗБ, Коростенський ЗЗБШ, Кременчуцький ЗЗБШ – застосовують 10-місні форми (2 ряди по 5 шпал у довжину). Через наявність елементів

негайного розпалублення – діафрагм-перегородок між торцями суміжних шпал, пустотоутворювачів отворів для закладних болтів (у шпал для рейкових скріплень клемно-болтового типу) шпали формують із жорстких бетонних сумішей. Тому використання пластифікуючих добавок для виробництва шпал ніколи не було актуальним, а ДСТУ Б В.2.6-57:2008 «Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 мм. Технічні умови» та його попередники – відповідні ГОСТи навіть не дозволяли застосовувати хімічні добавки.

Для забезпечення обертання форм шпали піддають тепловологісній обробці (ТВО) – пропарюванню. До 1990–2000-х років її температура сягала 80 і навіть 90 °С, що забезпечувало досягнення передаточної міцності 32 МПа через 8–10 годин. У 2000-х років у зв'язку з різким здороженням енергоносіїв собівартість шпал також різко збільшилась, і з 2010-х років температура пропарювання була знижена до 40–50 °С завдяки збільшенню активності цементів, припиненню двозмінної роботи, удосконаленню пустотоутворювачів або їх заміні закладними анкерами (у шпал для рейкових скріплень анкерного типу). Проте через подальше здороження енергоносіїв зниження температури і тривалості ТВО залишалось актуальним. З 2010-х років починається застосування хімічних добавок, переважно суперпластифікаторів-полікарбоксилатів, що разом з підвищенням активності цементу дозволило знизити витрати цементу менше 400 кг на метр кубічний. У новому ДСТУ Б В.2.6-209:2016 «Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови» застосування добавок вже допускається. Проте повної відмови від ТВО досі не досягнуто. До застосування добавок – прискорювачів твердіння залишається дуже обережне ставлення через корозійний вплив на арматуру більшості електролітів у разі передозування, їх застосування у ДСТУ Б В.2.6-209:2016

обмежується. Тому пошук нових добавок – прискорювачів твердіння, придатних для бетону шпал, є актуальним завданням.

**Визначення мети і завдання дослідження.** Мета дослідження – обґрунтування виробництва попередньо напружених залізобетонних шпал з природним твердінням бетону за рахунок застосування добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння – неелектролітів.

Завдання досліджень: аналітичний огляд літературних даних про можливості підвищення ранньої міцності бетону за рахунок хімічних та мінеральних добавок; пошукові дослідження з визначення впливу добавок на ранню міцність бетону та вибір добавок; експериментальні дослідження залежності ранньої міцності бетону від вмісту обраних добавок; електронно-мікроскопічні дослідження впливу добавок на структуру цементного каменю; потенціодинамічні та мікроскопічні дослідження впливу хімічних добавок на корозію сталеві арматури.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Дослідження, спрямовані на удосконалення технології залізобетонних шпал, проводились в УкрДУЗТ під керівництвом О. П. Мchedлова-Петросяна з 1960-х років. [1]. До 1990-х років ці дослідження були присвячені інтенсифікації твердіння бетону, підвищенню якості та довговічності шпал. З 1960-х років проводились дослідження з прискорення твердіння бетону шпал різними способами, у т. ч. комплексними хімічними добавками, що містили пластифікатори та прискорювачі твердіння [2] з різними компонентами аж до таких «екзотичних», як хлорид амонію, амінооцтова кислота, оксалат амонію [3].

Ці роботи узгоджувались з розвитком вітчизняної та світової науки в галузі бетонознавства [4–6] та ін. В. Б. Ратіновим була розроблена продуктивна класифікація добавок у бетони [4] на чотири класи: 1 і 2 – солі-електроліти, що є в основному прискорювачами тужавлення і твердіння

(додатково поділені на 5 груп, рис. 1), 3 – мінеральні добавки – кристалічні затравки, дисперсні частинки яких є підкладками для кристалізації продуктів гідратації (також

здатні прискорювати твердіння), 4 – поверхнево-активні речовини (ПАР), що є пластифікуючими та водоредукуючими добавками.



Рис. 1. Класифікація В. Б. Ратінова добавок солей-електролітів – прискорювачів твердіння

У 1980-х рр. дуже актуальною стала проблема недостатньої тріщиностійкості шпал, які масово не витримували стандартного випробування на тріщиностійкість або зазнавали утворення подовжніх тріщин на кінцевих ділянках від попереднього напруження арматурного дроту [7]. Аналогічна проблема виникла і під час виробництва залізобетонних попередньо напружених опор контактної мережі [8], залізобетонних плит безбаластного мостового полотна [9].

А. М. Плугінім зі співробітниками було з'ясовано, що тріщиностійкість шпал залежить від характеру структури бетону, формалізованого через показники коефіцієнтів розсунення зерен щебеню цементно-піщаним розчином  $\alpha$  та зерен піску цементним тістом (каменем)  $\mu$  [10, 11]. Ці коефіцієнти характеризують ступінь заповнення простору між зернами щебеню та піску цементно-піщаним розчином та цементним каменем відповідно:

$$\alpha = \frac{V_{цпр}}{V_{нус}^{щ}} = \frac{\frac{\Pi}{\rho_{іст}^n} + \frac{\mathcal{C}}{\rho_{іст}^щ} + \frac{B}{\rho^6}}{\frac{\mathcal{C}}{\rho_{нас}^{щ}} \cdot Пус^{щ}}}; \quad \mu = \frac{V_{цт}}{V_{нус}^n} = \frac{\frac{\mathcal{C}}{\rho_{іст}^щ} + \frac{B}{\rho^6}}{\frac{\Pi}{\rho_{нас}^n} \cdot Пус^n}, \quad (1)$$

де  $V_{цпр}$ ,  $V_{цт}$  – об'єм цементно-піщаного розчину та цементного тіста відповідно в  $1 \text{ м}^3$  бетону,  $\text{м}^3$ ;  $V_{нус}^{щ}$ ,  $V_{нус}^n$  – об'єм пустот відповідно у щебені та піску, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  бетону, у вихідному (природно насипному) стані,  $\text{м}^3$ ;  $\mathcal{C}$ ,  $\Pi$ ,  $\mathcal{C}$ ,  $B$  – витрата відповідно щебеню, піску, цементу та води на  $1 \text{ м}^3$  бетону,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{іст}^{щ}$ ,  $\rho_{іст}^n$ ,  $\rho_{іст}^щ$ ,  $\rho^6$  – істинна густина щебеню, піску, цементу та

густина води відповідно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{нас}^{щ}$ ,  $\rho_{нас}^n$  – насипна густина щебеню та піску відповідно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $Пус^{щ}$ ,  $Пус^n$  – пустотність щебеню та піску відповідно.

А. М. Пługінім, О. А. Калінінім та ін. вдалось майже усунути проблему недостатньої тріщиностійкості шляхом забезпечення оптимальних значень цих коефіцієнтів  $\alpha_{опт}$  і  $\mu_{опт}$  [11, 12]:

$$\alpha_{опт} = 2,1 \cdot (1 + d_{щ}/d_{щ})^3 - 1,1; \quad \mu_{опт} = 2,1 \cdot (1 + d_{щ}/d_{щ})^3 - 1,1, \quad (2)$$

де  $d_{щ}$ ,  $d_{п}$ ,  $d_{щ}$  – середній розмір зерен щебеню та піску і частинок цементу відповідно,  $\text{м}$ .

У разі дотримання  $\alpha_{опт}$  і  $\mu_{опт}$  забезпечуються також максимальні показники водонепроникності бетону та його міцності, у т. ч. у ранні терміни твердіння.

У 2000-х рр. у зв'язку зі значним здороженням енергоресурсів, особливо газу, надто актуальною стає проблема скорочення тепловологісної обробки шпал без шкоди для їхньої якості, зокрема тріщиностійкості. А. М. Пługінім, А. А. Пługінім, О. В. Романенком та ін. було виконано дослідження [13–17], за результатами яких вдалось розробити склади бетону, що забезпечували значні зниження температури і тривалості тепловологісної обробки [18–19]. Підвищення ранньої міцності в цьому випадку було забезпечено сполученням оптимального складу бетону з  $\alpha_{опт}$  і  $\mu_{опт}$  з уведенням добавок суперпластифікатора сульфонафталфінформальдегіду С-3 і прискорювачів твердіння хлориду та нітрату кальцію. Було експериментально доведено, що максимальне збільшення ранньої міцності забезпечено саме сполученням хлориду та нітрату кальцію у співвідношенні близько 1:1.

Оскільки нітрат і, особливо, хлорид кальцію можуть спричинити корозійний вплив на арматуру, особливо попередньо напружену із високоміцного дроту з низьковуглецевої сталі, можливість такого впливу була ретельно перевірена А. А. Пługінім, Р. Ф. Руновою та ін. [20]. У результаті теоретичних та експериментальних досліджень було доведено, що у разі помірного сумарного вмісту хлориду та нітрату кальцію не більше 1% від маси цементу вони не спричиняють корозійного впливу на зазначену арматуру через хімічне зв'язування у гідрохлоралюмінати та гідронітроалюмінати кальцію. Проте у наукової і виробничої спільноти залишилось дуже обережне ставлення до застосування прискорювачів твердіння – електролітів через їх корозійний вплив на арматуру у разі передозування, і їх застосування у розробленому УкрДУЗТ ДСТУ Б В.2.6-209:2016 не було дозволене. Тому пошук нових шляхів підвищення ранньої міцності бетону, у т. ч. добавок – прискорювачів твердіння, придатних для бетону шпал, дотепер залишається актуальним завданням. Так, у роботі [21] саме для бетону залізобетонних підрейкових основ пропонується



комплексний підхід, який полягає у ретельному підборі ефективних та сумісних між собою високоактивного цементу і добавки полікарбосилату та «малопаронагрівної та/або без пропарювальної» технології. Проте передаточна міцність за «безпропарювальною» технологією за 8–10 годин не досягається. У [22, 23] пропонується отримувати високу ранню міцність цементу і, відповідно, бетону, завдяки створеному високоактивному «мультимодальному» цементу, який крім клінкера містить мінеральні добавки трьох різних видів – доменний граншлак, пуцолану та вапняк. Висока рання міцність досягається, на нашу думку, завдяки утворенню більшої кількості електрогетерогенних контактів. Проте рання міцність визначається у віці 2 доби, а досягнута величина міцності через 24 години, очевидно, не є достатньою для шпал.

Прискорювачами-неелектролітами, як було визначено В. Б. Ратіновим [4], є мінеральні добавки – кристалічні затравки. Такою може бути метакаолін [24], проте він уводиться для запобігання внутрішній корозії бетону від взаємодії лугів цементу з активним кремнеземом заповнювачів і без додаткового диспергування не тільки не підвищує, а навіть знижує ранню міцність бетону. У [24] пропонується така добавка, як нанодисперсний сульфалоюмінат кальцію, яка отримується шляхом інтенсивного активуючого змішування гідроксиду та алюмінату кальцію і спільно з полікарбосилатом забезпечує високу ранню міцність. Широкі плідні дослідження з прискорення твердіння портландцементу та бетону останніми роками проводяться у Львівській політехніці під керівництвом М. А. Саницького [22, 23, 25, 26]. У роботах [25, 26] за рахунок застосування комплексних добавок, що складаються із полікарбосилату, нанодисперсної мінеральної добавки (кремнезему, метакаоліну), сульфату натрію (лужного активатора), вдалось отримати в умовах природного твердіння ранню міцність до

52 МПа. Проте ці бетони розроблені переважно для монолітного будівництва, їх рання міцність визначається у віці 2 доби, а фактична міцність через 24 години твердіння не визначається й, очевидно, є недостатньою для шпал.

Аналіз ринку добавок показав, що на ньому з'явилися добавки, наприклад Master X-Seed 100 виробництва BASF, що є «суспензією активних наночастинок... для прискорення процесу гідратації на ранніх термінах (6–12 годин)». Регіональні представники компанії BASF не володіють інформацією про склад «суспензії», проте у [24, 26] шляхом фізико-хімічних досліджень встановлено, що вона є дисперсією гідросилікатів кальцію, на які вказував В. Б. Ратінов. Отже, для подальших досліджень як добавку прискорювач-неелектроліт обрано Master X-Seed 100. Проте останніми роками у виробництві та утриманні шпал виникли нові проблеми, що вимагають урахування під час досліджень утворення тріщин, пов'язане з новими факторами, такими як зміна конструкції скріплення на анкерне [27, 28], зміна якості цементу і заповнювачів, що часто обумовлює утворення у шпалах просторової сітки тріщин внаслідок взаємодії лугів цементу з кремнеземом реакційно здатних заповнювачів [29]. Для усунення тріщин у [28] запропоновано підвищити клас бетону шпал з С32/40 до С40/50, проте без підвищення передаточної міцності.

Таким чином, робочу гіпотезу досліджень можна сформулювати таким чином: максимальне підвищення ранньої міцності бетону можливе у разі застосування бетону оптимального складу з комплексною добавкою суперпластифікатора полікарбосилату і прискорювача, що не спричиняє корозійного впливу на арматуру, - дисперсії гідросилікатів кальцію як кристалічної затравки для швидкого утворення кристалогідратів.

#### **Основна частина дослідження**

*Матеріали і методи експериментальних досліджень.* Пошукові дослідження

впливу добавок на властивості бетону здійснювали на ПрАТ «Гніванський завод спеціалізований бетон» на заводських складах бетону класу С32/40 із стандартних матеріалів, що застосовуються для масового виробництва залізобетонних шпал [30].

Для експериментальних досліджень впливу добавок на властивості бетону застосовували: портландцемент ПЦ І-500Н ДСТУ Б В.2.7-46:2010 (ПЦ) Волинь-Цемент

(ПрАТ «Дікергоф Цемент Україна»); пісок кварцовий дуже дрібний ДСТУ Б В.2.7-32-95; щебінь гранітний суміші фракцій 5–20 мм ДСТУ Б В.2.7-75-98; воду питну водопровідну ДСТУ 7525:2014; хімічні та мінеральні добавки, наведені у табл. 1, дозування яких визначали згідно з рекомендаціями виробників. Дозування  $CaCl_2$  та  $Ca(NO_3)_2$  прийняли згідно з [13, 14].

Таблиця 1

Добавки в бетон, застосовані для експериментальних досліджень

Тип добавки	Назва добавки	Марка або хімічна формула	Виробник	Позначення	Дозування, мас. % від витрати цементу
Суперпластифікатор - Аніонна ПАР	Полікарбоксилат	K-17	Містім	Містім	0,8
		E.Fix-AB.27	АрхБуд	АрхБуд	0,7
		Plastidor 2 Extra	Доронік	Plastidor	0,4
		ViscoCrete-1030	Sika	ViscoCrete	
		Master Glenium ACE-430	BASF	ПК	1
Прискорювачі твердіння – солі-електроліти	Хлорид кальцію	$CaCl_2$	Підприємства хімічної промисловості	ХНК	1 (0,5+0,5)
	Нітрат кальцію	$Ca(NO_3)_2$			
Активна мінеральна добавка	Дисперсія гідросилікатів кальцію	Master X-Seed 100	BASF	ГСК	2; 6,48...7,3

Склади бетону для експериментальних досліджень призначали за методикою УкрДУЗТ [12, 31] із забезпеченням визначених за формулою (2) оптимальних величин коефіцієнтів розсунення зерен крупного та дрібного заповнювачів  $\alpha_{opt}=1,12$ ,  $\mu_{opt}=1,79$  відповідно. Властивості бетону визначали на зразках-кубах з розміром ребра 100 мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008, ДСТУ Б В.2.7-214:2009.

Електронно-мікроскопічні дослідження морфології та електронно-зондовий мікроаналіз локального елементного складу цементного каменю з добавками виконували на їх відколах за допомогою сканувального електронного мікроскопа

JEOL JSM-6390LV з енергодисперсійним спектрометром AZtechEnergy X-max<sup>n</sup> 50 (Японія). Зйомку проводили за прискорювальної напруги 15 кВ.

Корозійний вплив бетону з добавками на сталеву арматуру досліджували потенціодинамічним та оптико-мікроскопічним методами на зразках-призмах розміром 160×40×40 мм, в яких по центральній поздовжній осі симетрії розташовано сталевий стержень діаметром 3 мм і довжиною 120 мм. Стержні, у т. ч. їхні торці, перед закладенням у зразки-призми були зачищені наждачним папером та знежирені ацетоном. Зразки-призми виготовляли із цементно-піщаного розчину

складу 1:1,53 з В/Ц 0,56 (розчинної частини бетону). Виготовлено чотири серії по три зразки в кожній: 1 – контрольні без добавок (б/д); 2 – з добавкою 1 % Master Glenium ACE 430 (СП); 3 – з добавками 1 % Master Glenium ACE 430 і 2 % Master X-Seed100 (СП+ГСК); 4 – з добавками 1 % Master Glenium ACE 430, 0,5 %  $\text{CaCl}_2$  та 0,5 %  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (СП+ХНК).

Потенціодинамічні дослідження здійснювали за схемою, наведеною на рис. 2 згідно з [32] та з урахуванням вимог [22] за допомогою таких приладів та обладнання: потенціостат з діапазоном регульованих напруги в межах не менше 5–1000 мВ та сили струму в межах не менше 1–1000 мкА; термометр з діапазоном вимірювань у межах не менше 10–30 °С; електрод порівняння хлорсрібний насичений; допоміжний електрод – сталевий стержень діаметром 5–6 мм, довжиною 120–150 мм; посудина з електроізоляційного матеріалу (скла) з внутрішнім діаметром не менше 70 мм і висотою 160–200 мм; електролітичний ключ – скляна трубка діаметром 3–5 мм з краном, заповнена насиченим розчином хлористого калію.

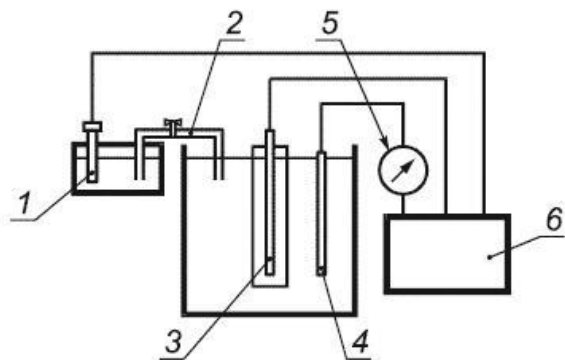


Рис. 2. Електрична схема зняття потенціодинамічних поляризаційних кривих: 1 – електрод порівняння; 2 – електролітичний ключ; 3 – зразок; 4 – допоміжний електрод; 5 – мікроамперметр; 6 – потенціостат

Електрохімічні вимірювання проведено після досягнення бетоном проектної міцності через 28 діб і через 6 місяців.

Вимірювання здійснювали на трьох паралельних зразках. Зразки бетону з арматурою до початку вимірювання насичували питною водою шляхом кип'ятіння протягом 3 год. Перед початком випробування з одного торця зразка-балочки сколювали бетон, оголюючи арматурний стержень на 20 мм  $\pm$  10 мм. Вимірювання сили струму в мікроамперах виконували в зразку через 60 $\pm$ 5 хвилин після вмикання потенціостата (рис. 2), після чого знімали анодну частину поляризаційної кривої при проходженні діапазону від потенціалу, що встановився, до плюс 1000 мВ протягом 60 хвилин. Густина струму  $i$ , мкА/см<sup>2</sup> при кожному фіксованому значенні потенціалу знаходили за формулою:

$$I = I/S, \quad (3)$$

де  $I$  – сила струму, мкА;  $S$  – площа робочої поверхні електрода (стержня), см<sup>2</sup>.

Площу робочої поверхні сталевого стержня, що стикається з бетоном,  $S$ , см<sup>2</sup>, розраховували за формулою:

$$S = \pi D l + \pi D^2/4, \quad (4)$$

де  $D$  – діаметр сталевий стержня, см;

$l$  – довжина сталевий стержня, що занурений у бетон, см.

Критерії оцінки захисної дії бетону до сталевий арматури прийнято відповідно до [32, 33].

Оптико-мікроскопічні дослідження корозійного впливу добавок на сталеву арматуру здійснювали після витримання зразків протягом 1 року у перемінному рівні води за середньорічної температури 16 °С та звільнення поверхні арматури від бетону. Поверхню арматури вивчали за допомогою бінокулярного мікроскопа МБС-2 за збільшення  $\times 7$ ;  $\times 12,5$ ;  $\times 25$ ;  $\times 50$ ;  $\times 88$ , знімки поверхні отримували за допомогою цифрової камери з роздільною здатністю 68 Мп.

*Результати експериментальних досліджень та їх обговорення.* Пошукові дослідження виконані на Гніванському заводі спеціалізованого бетону. Визначено міцність на стиск бетону з добавками суперпластифікаторами полікарбоксилатного типу різних виробників, досягнуту після тепловологісної обробки (через 24 год після формування). Зразки виготовляли із рівнорухомих сумішей, температура ізотермічної витримки складала 40–50 °С. Встановлено, що застосування суперпластифікаторів дозволило знизити В/Ц з 0,272 до 0,236 (Містім), 0,222 (АрхБуд), 0,25 (Plastidor) та підвищити міцність з 44 МПа до 48,1 МПа (на 9,3 %, Містім), 54,3 МПа (на 23,5 %, АрхБуд), 55,4 МПа (на 25,9 %, Plastidor). Застосування VisoCrete підвищення міцності не забезпечило, що може свідчити про її несумісність із застосованим цементом.

Отже, в результаті пошукових досліджень встановлено, що застосування тільки суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу дає змогу підвищити ранню міцність бетону після тепловологісної обробки за 40–50 °С на 9,3–25,9 % в основному за рахунок зниження В/Ц. Проте кожен добавку необхідно

перевіряти на сумісність із застосованим цементом.

Досліджено кінетику набору міцності на стиск під час природного твердіння за температури 18–20 °С бетону з добавками, у т. ч. комплексними. Отримані кінетичні криві наведено на рис. 3, величини досягнутої міцності після тепловологісної обробки, а також після 1, 7 та 28 діб природного твердіння наведено на рис. 4 і в табл. 2.

Із рис. 3, 4 і табл. 2 випливає, що досліджувані комплексні добавки не тільки підвищили міцність після тепловологісної обробки в будь-яких сполученнях, але й знизили її на 8,2–41,4 %. Навпаки, за природного твердіння всі досліджені добавки та їх сполучення обумовили підвищення міцності бетону в будь-які її терміни. Найбільшу міцність у ранній термін природного твердіння (1 доба) 20,8 МПа зі збільшенням міцності відносно контролю на 49,6 % забезпечило сполучення суперпластифікатора-полікарбоксилату з дисперсією гідросилікатів кальцію. Таке сполучення добавок забезпечило підвищення міцності відносно бетону без добавок на 49,6 %.

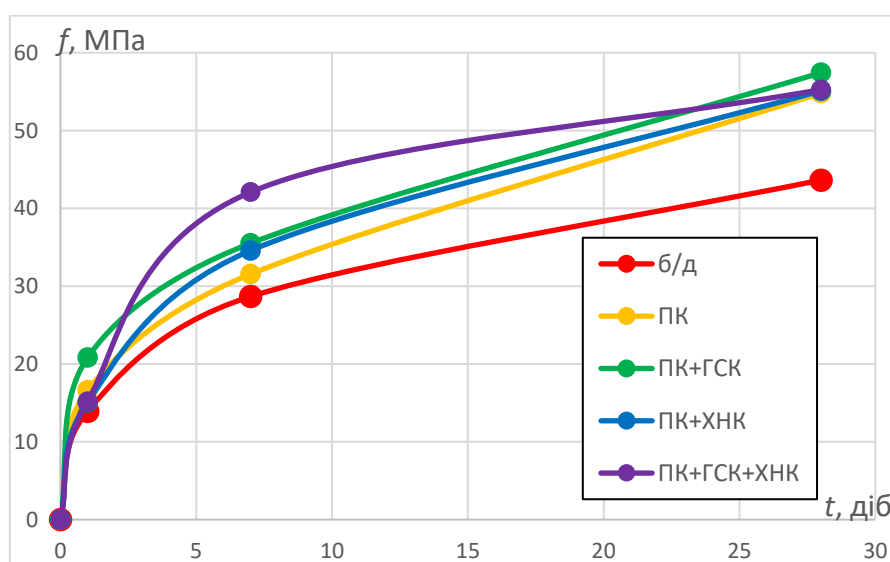


Рис. 3. Кінетика набору міцності бетону без добавок б/д і з добавками ПК, ПК+ГСК, ПК+ХНК, ПК+ГСК+ХНК

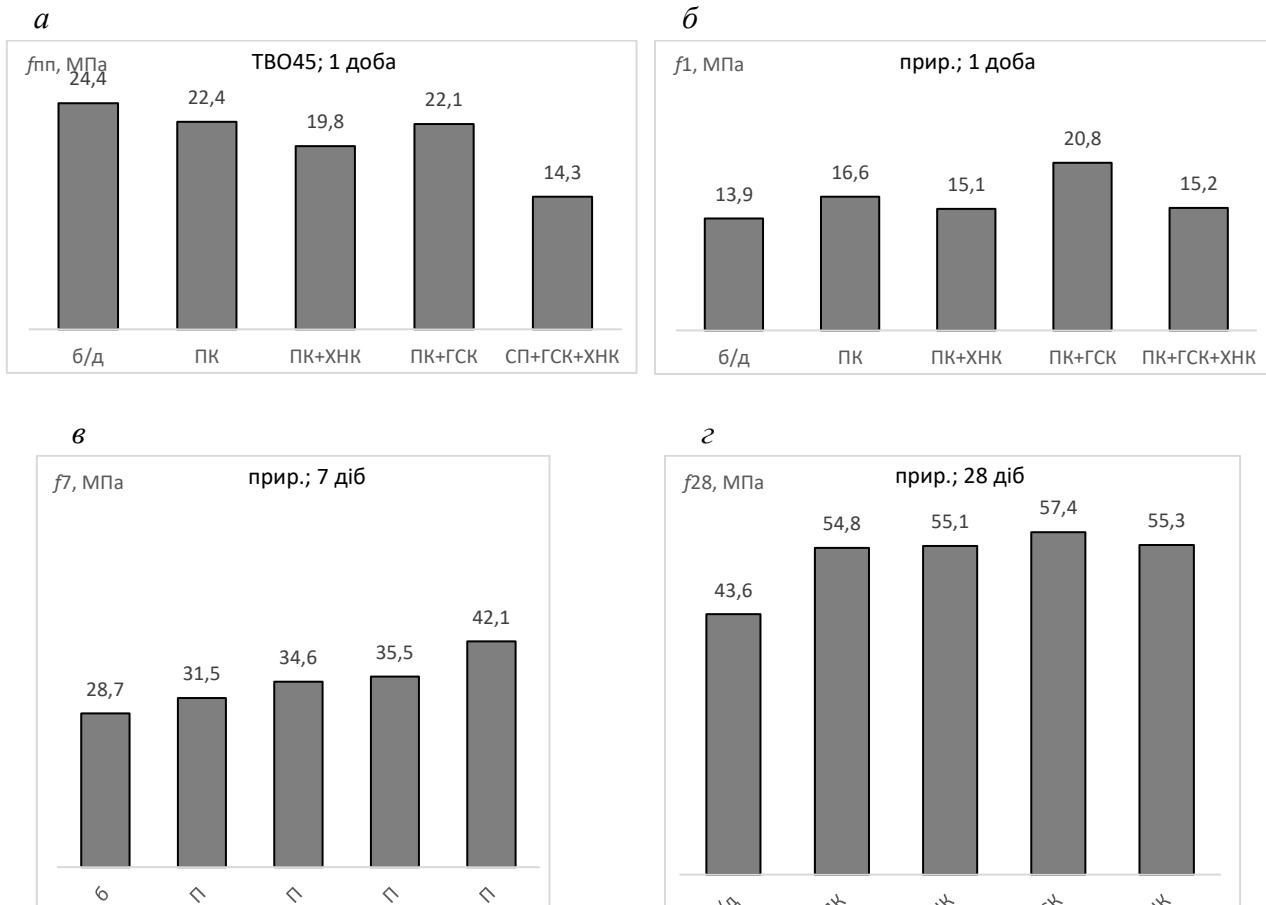


Рис. 4. Діаграми міцності бетону з добавками після пропарювання (а) і після 1 (б), 7 (в) та 28 (г) діб природного твердіння

Таблиця 2

Міцність на стиск бетону без добавок і з добавками після ТВО, а також 1, 7 і 28 діб природного твердіння

Сполучення добавок	Міцність на стиск $f$ , МПа				Підвищення міцності на стиск відносно бетону без добавки, %			
	після ТВО 45 °С	після природного твердіння, діб			після ТВО 45 °С	після природного твердіння, діб		
		1	7	28		1	7	28
б/д	24,4	13,9	28,7	43,6				
ПК	22,4	16,6	31,5	54,8	-8,2	+19,4	+9,8	+25,7
ПК+ГСК	22,1	20,8	35,5	57,4	-9,4	+49,6	+23,7	+31,7
ПК+ХНК	19,8	15,1	34,6	55,1	-18,9	+8,6	+20,6	+26,4
ПК+ГСК+ХНК	14,3	15,2	42,1	55,3	-41,4	+9,4	+46,7	+26,8

Виконано електронно-мікроскопічні дослідження цементного каменю з добавками. На рис. 5 наведено електронно-мікроскопічні знімки цементного каменю

без добавок (б/д, рис. 5, а) з добавкою суперпластифікатора-полікарбоксилату Master Glenium ACE-430 (ПК, рис. 5, б), з комплексними добавками суперпластифікатора-

полікарбоксилату і прискорювача-електроліта (ПК+ХНК, рис. 5, в) і суперпластифікатора-полікарбоксилату та прискорювача твердіння Master X-Seed 100 (ПК+ГСК, рис. 5, з). За невеликих збільшень  $\times 50$ – $100$  (ліві знімки) структура цементного каменю майже не розрізняється. За великих збільшень  $\times 5000$ – $10000$  (центральні та праві знімки) структура продуктів гідратації відрізняється, зокрема у продуктах гідратації всіх зразків наявні як гелеподібні утворення гідросилікатів кальцію, так і кристалогідрати, з яких в усіх зразках спостерігаються лише гексагональні пластинки портландиту. З інших кристалогідратів лише в цементному камені без добавок і з добавкою ПК проглядаються окремі кубічні кристали алюмінатів кальцію, а в цементному камені без добавок, з добавками ПК і ПК+ГСК спостерігаються голчасті кристали *Aft*-фази – еtringіту, причому у зразках без добавок і з добавкою ПК їхня довжина не перевищує 2 мкм, а у зразках з ПК+ГСК досягає 5–7 мкм. Кристалічні утворення у зразках ПК+ХНК відрізняються від зазначених вище і є, очевидно, *AFm*-фазою, утвореною за участю не тільки сульфату, а й хлориду та нітрату кальцію. Це підтверджується результатами електронно-зондового мікроаналізу локального елементного складу, який показав у зразках з добавками ПК+ХНК незначну кількість хлору, очевидно, зв'язаного цією *AFm*-фазою. Таким чином, за результатами електронно-мікроскопічних досліджень можна зробити висновок, що добавка лише СП майже не змінює структуру продуктів гідратації. Комплексні добавки призводять до утворення додаткової кількості кристалогідратів: ПК+ХНК – *AFm*-фази, що містить хлорид та нітрат кальцію, а ПК+ГСК – *Aft*-фази еtringіту з більш довгими кристалами довжиною до 5–7 мкм.

Такі результати електронно-мікроскопічних досліджень дозволили пояснити механізм впливу добавки дисперсних гідросилікатів кальцію на

ранню міцність за допомогою схем, наведених на рис. 6. На схемах рис. 6, а, б бачимо прошарок між двома частинками цементу, зокрема фрагментів їх поверхонь  $C_3S$  і  $C_2S$ , які одразу після замішування заповнені водою або розчином ПАР (ПК) у воді. Цементне тісто при цьому перебуває у пластичному стані. На початкових стадіях гідратації  $C_3S$  (і  $C_3A$ ) розчиняється та утворює пересичений розчин відносно портландиту *CH* та гідросилікатів кальцію  $C_2SH$ , які кристалізуються (конденсуються) поблизу поверхонь частинок цементу (мінеральних добавок, заповнювачів, рис. 6, в, з). Без застосування дисперсії ГСК, незважаючи на те, що між продуктами гідратації і поверхнею частинок утворюються електрогетерогенні контакти, прошарки між ними ще певний час залишаються незаповненими продуктами гідратації, потім нещільно заповненими (рис. 6, в), тому пластичність втрачається, а міцність набувається повільніше. В цьому випадку прискорення твердіння досягається застосуванням суперпластифікаторів, які дозволяють знизити витрату води, а отже, зробити меншою первинну товщину прошарків, скоротивши час на їх заповнення, прискорювачів-електролітів, які прискорюють хімічні реакції, забезпечують більш швидку коагуляцію або впливають за іншими механізмами класифікації В. Б. Ратінова (рис. 1). У випадку застосування добавки дисперсії гідросилікатів кальцію вони розподіляються по об'єму прошарків і відіграють роль кристалічних затравок – центрів кристалізації за В. Б. Ратіновим, на яких, як і на поверхнях  $C_2S$  частинок цементу, утворюються кристали *CH* і вже на них, конденсується гель  $C_2SH$  (рис. 6, з). Завдяки цьому прошарки набагато швидше заповнюються продуктами гідратації, які утворюють між частинками ланцюжки з електрогетерогенними контактами (рис. 6, е). Застосування одночасно з ГСК суперпластифікаторів і прискорювачів-електролітів має підвищити ефект

прискорення. Отже, встановлений експериментальними дослідженнями найбільший прискорюючий ефект добавки ПК+ГСК пояснюється тим, що частинки ГСК збільшують площу поверхонь, на яких відбувається кристалізація (конденсація)

продуктів гідратації цементу, та забезпечують більш швидке заповнення ними прошарків між частинками цементу (мінеральних добавок, заповнювачів) з утворенням ланцюжків з електрогетерогенними контактами.

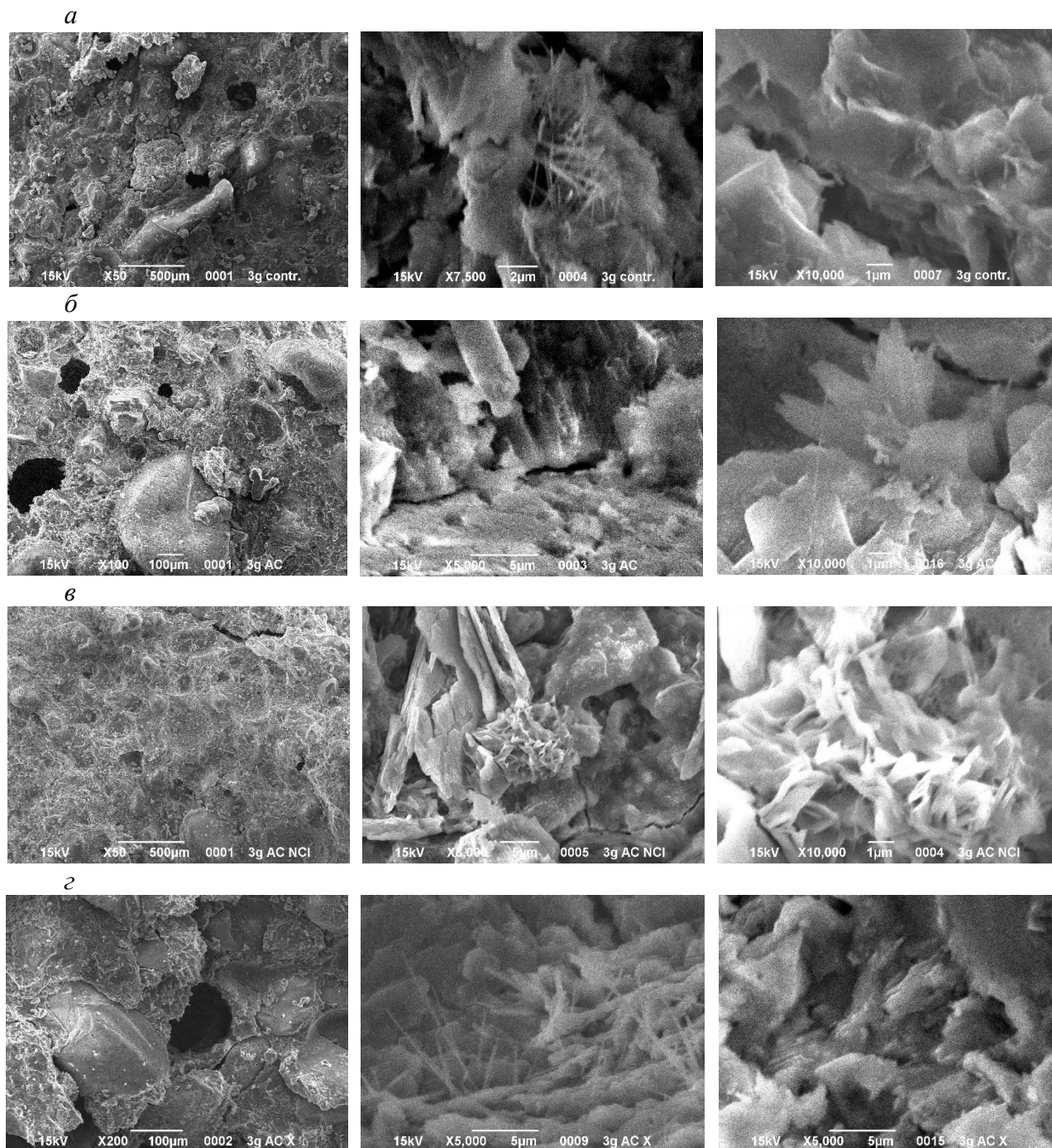


Рис. 5. Електронно-мікроскопічні знімки відколів цементного каменю без добавок б/д (а) і з добавками ПК (б), ПК+ХНК (в), ПК+ГСК (г). Збільшення від  $\times 50$  до  $\times 10000$

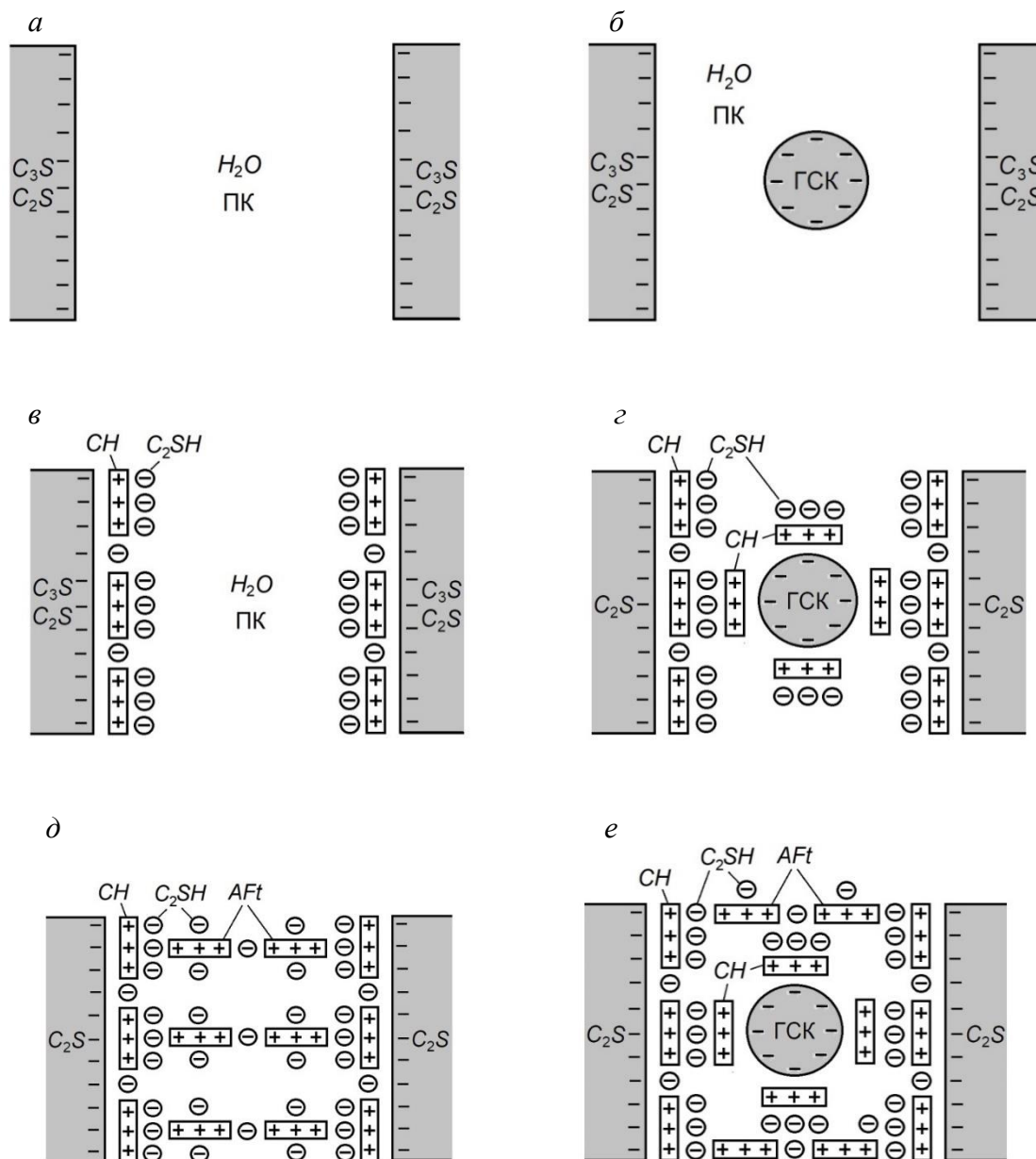


Рис. 6. Схема розвитку процесу тужавлення і початкової стадії твердіння цементу без добавок або з добавками ПК, ПК+ХНК (а, в, д) і з добавками ПК+ГСК (б, г, е): а, б – стан одразу після змішування водою; в, г – утворення перших продуктів гідратації поблизу поверхонь частинок цементу та добавки дисперсних гідросилікатів кальцію; д, е – подальше утворення продуктів гідратації в об’ємі. C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S – клінкерні мінерали цементу; ПК – добавка-полікарбоксилат; ГСК – добавка дисперсних гідросилікатів кальцію; CH – кристалогідрати портландиту; C<sub>2</sub>SH – гідросилікатний гель; AFt – кристалогідрати AFt-фази еtringіту (та/або AFm-фази для ПК+ХНК)

Корозійний вплив добавок на сталеву арматуру досліджено шляхом потенціодинамічних вимірювань. Результати дослідження у вигляді графіків

(поляризаційних кривих) у координатах: густина струму  $i$ , мкА/см<sup>2</sup>, – потенціал робочого електрода  $E$ , мВ, наведені на рис. 7 і в табл. 3. Як видно із рис. 7, за потенціалу



300 мВ (насичений каломельний електрод) густина струму як для контрольних зразків без добавок, так і для бетону з добавками після 28 діб та 6 місяців твердіння не перевищує 10 мкА/см<sup>2</sup>, що свідчить про те, що арматурна сталь в усіх випадках залишається в пасивному стані. Для бетону з комплексною добавкою суперпластифі-

катора полікарбонату Master Glenium ACE-430 та дисперсії гідросилікатів кальцію Master X-Seed 100, судячи за мінімальними кутами нахилу поляризаційних кривих та величинами густини струму (3; 2; 52; 34 мкА/см<sup>2</sup>), спостерігається найменша корозійна небезпека, навіть менша, ніж для бетону без добавок.

Таблиця 3

Густина струму стікання з арматури у бетоні з добавками

Добавки	Густина струму, мкА/см <sup>2</sup> , за накладеного потенціалу, В, у віці бетону			
	300		900	
	28 діб	6 міс.	28 діб	6 міс.
б/д	5	4	53	60
ПК	4,5	2	52	39
ПК+ХНК	4,5	2	66	48
ПК+ГСК	3	2	52	34

Результати світлової мікроскопії корозійного впливу бетону з добавками у вигляді знімків поверхні арматури наведені на рис. 8. У цілому вони підтверджують висновки потенціодинамічних вимірювань. На арматурі, що експонувалась у бетоні без добавок (рис. 8, а), слідів корозії не виявлено зовсім, у бетоні з добавкою ПК (рис. 8, б) спостерігається ледь видимий лише зі значним збільшенням  $\times 88$  коричнюватий наліт продуктів рівномірної корозії. На арматурі, що експонувалась у бетоні з добавками ПК+ХНК і ПК+ГСК, наліт продуктів корозії видимий краще, корозія нерівномірна (рис. 8, в, г).

Отже, встановлено, що досліджені добавки не спричиняють корозійного впливу на арматурну сталь, особливо ПК+ГСК, за якої густина струму стікання з арматури в бетон за накладеного потенціалу 0,9 В, зменшується з 60 до 34 мкА/см<sup>2</sup>, тобто на  $(60-34) \times 100 / 60 = 54\%$ .

Результати експериментальних досліджень у сукупності підтвердили

висунуте припущення про максимальне підвищення ранньої міцності бетону у разі застосування бетону оптимального складу з комплексною добавкою суперпластифікатора полікарбонату і прискорювача, що не спричиняє корозійного впливу на арматуру, - дисперсії гідросилікатів кальцію як кристалічної затравки для швидкого утворення кристалогідратів. Проте величини передаточної міцності 32 МПа для шпал через 24 години твердіння досягти не вдалось (рис. 3, 4). Її отримання без підвищення температури можливо через 2 доби, отже, для партій шпал, заформованих у передвхідні та передсвяткові дні. Для партій шпал, заформованих у звичайні робочі дні, розпалублення яких здійснюється через 24 години, має застосовуватись малопрогрівний режим твердіння за температур ізотермічної витримки 40–50 °С.

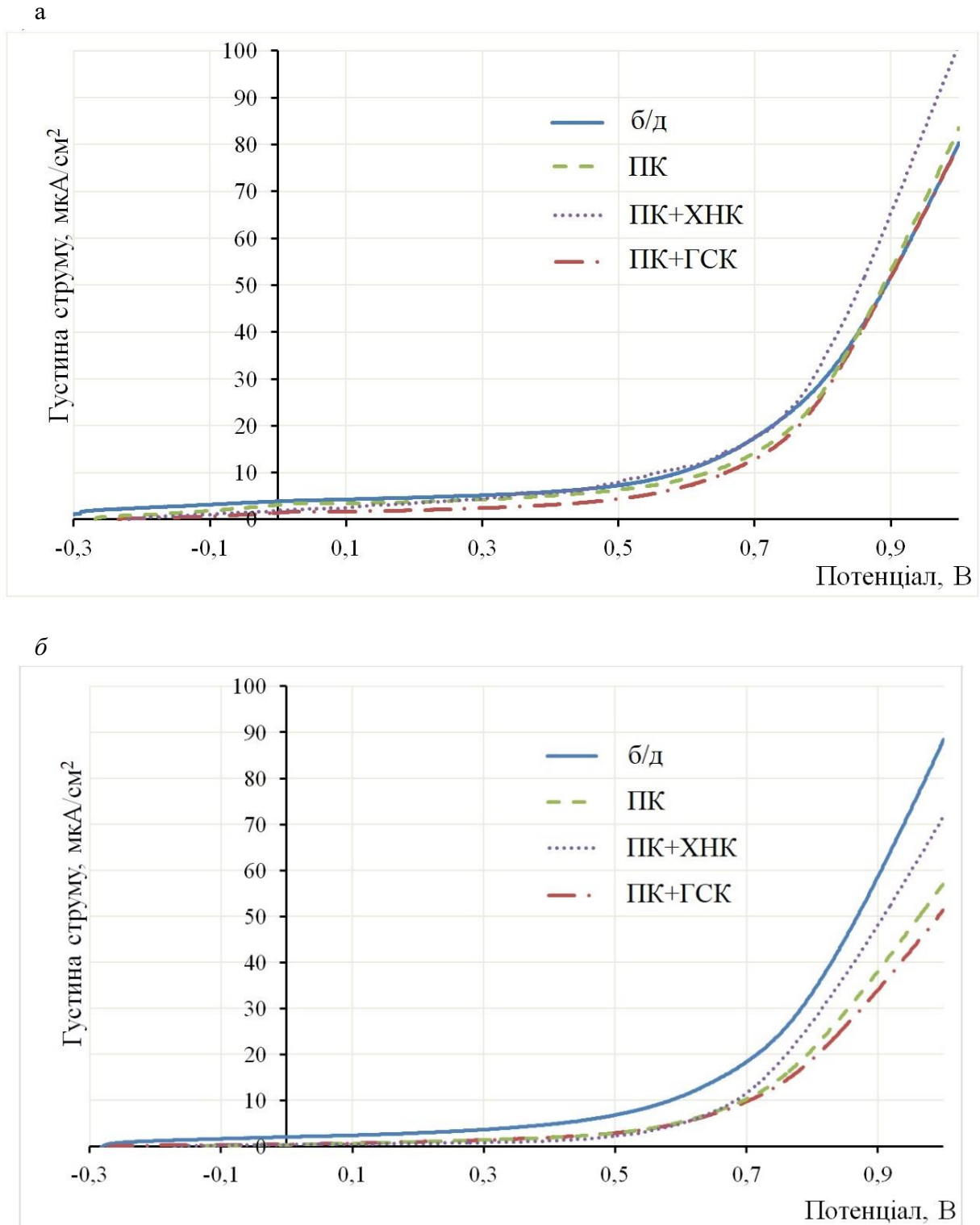


Рис. 7. Поляризаційні криві сталевих стержнів у бетоні з добавками після 28 діб (а) та 6 місяців (б) твердіння

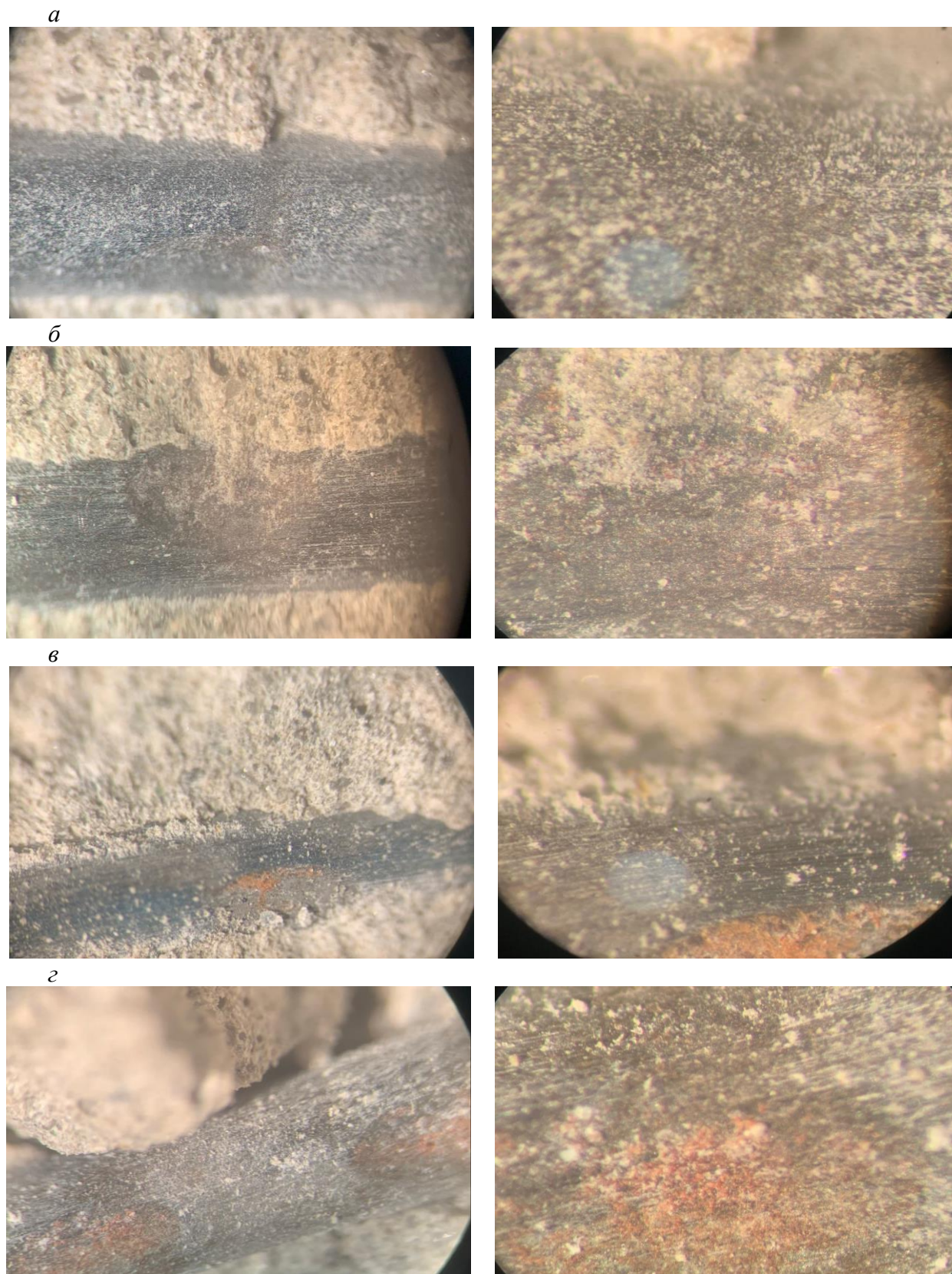


Рис. 8. Стан арматурного дроту після витримування протягом 1 року в перемінному рівні води зразків бетону без добавок б/д (а) і з добавками ПК (б), ПК+ХНК (в), ПК+ГСК (г).  
Світлова мікроскопія, збільшення  $\times 25$  (ліворуч),  $\times 88$  (праворуч)

**Висновки.** Встановлено, що комплексні добавки ПК і прискорювачів твердіння – електролітів (хлориду та нітрату кальцію ХНК) та/або дисперсії гідросилікатів кальцію ГСК в умовах природного твердіння забезпечують підвищення ранньої міцності бетону. Максимальне збільшення міцності відносно контролю на 50 % забезпечила добавка ПК+ГСК. Проте деякі комплексні добавки, що прискорюють природне твердіння, можуть знизити міцність після ТВО на 8–41 % і мають перед застосуванням перевірятись.

За результатами електронно-мікроскопічних досліджень встановлено, що добавка лише ПК майже не змінює структуру продуктів гідратації. Комплексні добавки призводять до утворення додаткової кількості кристалогідратів: ПК+ХНК – *AFm*-фази, що містить хлорид та нітрат кальцію, а ПК+ГСК – *Aft*-фази еtringіту з більш довгими кристалами довжиною до 5–7 мкм. Розроблено схему розвитку процесу тужавлення і початкової стадії твердіння цементу без добавок або з добавками ПК, ПК+ХНК, ПК+ГСК, за допомогою яких встановлений експериментальними дослідженнями найбільший прискорювальний ефект добавки ПК+ГСК пояснено тим, що частинки ГСК збільшують площу поверхонь, на яких відбувається кристалізація (конденсація) продуктів гідратації цементу, і забезпечують більш

швидке заповнення ними прошарків між частинками цементу (мінеральних добавок, заповнювачів) з утворенням ланцюжків з електрогетерогенними контактами.

У результаті потенціодинамічних та мікроскопічних досліджень встановлено, що добавка ПК та комплексні добавки ПК+ХНК і ПК+ГСК у досліджених дозуваннях не спричиняють корозійного впливу на сталеву арматуру, особливо ПК+ГСК, з якою густина струму стікання з арматури в бетон за накладеного потенціалу 0,9 В зменшується відносно бетону без добавок з 60 до 34 мкА/см<sup>2</sup>, тобто на 54 %.

Результати експериментальних досліджень у сукупності підтвердили висунуте припущення про максимальне підвищення ранньої міцності бетону у разі застосування бетону оптимального складу з комплексною добавкою суперпластифікатора-полікарбоксилату і прискорювача, що не спричиняє корозійного впливу на арматуру, - дисперсії гідросилікатів кальцію як кристалічної затравки для швидкого утворення кристало-гідратів. Проте величини передаточної міцності 32 МПа для шпал через 24 години природного твердіння досягти не вдалось. Її отримання можливо через 2 доби, отже, для партій шпал, заформованих у передвихідні та передсвяткові дні. Для партій шпал, розпалублення яких здійснюється через 24 години, має застосовуватись малопрогрівний режим твердіння за температур 40–50 °С.

### Список використаних джерел

1. Железобетонные шпалы (Вопросы изготовления и эксплуатации. Проблемы надежности и долговечности) / под ред. О. П. Мчедлова-Петросяна. *Труды ХИИТа*. 1971. № 122. 64 с.
2. Мчедлов-Петросян О. П., Ушерев-Маршак А. В., Колесниченко Л. К. Основы и методы ускорения твердения бетона. *Труды ХИИТа*. 1966. № 86. С. 18–30.
3. Гасан Ю. Г., Кутах А. П. Комплексные добавки – интенсификаторы твердения бетона. *Интенсификация производства сборного железобетона: межвуз. сб. научн. тр. ХИИТ*. 1986. С. 28–30.
4. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. Москва: Стройиздат, 1989. 188 с.
5. Ramachandran V. S., Feldman R. F. Concrete admixture handbook. Properties, Science, and Technology. Noyes Publication. USA, 1984.
6. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. Москва, 1998. 768 с.

7. Рыльцева Т. Н. Повышение трещиностойкости защитного слоя струнбетона в зоне передачи напряжений: автореф. дис. ... к. т. н.: 05.23.05/ ХАДИ. Харьков, 1986. 20 с.
8. Плугин А. А. Повышение качества опор контактной сети на основе применения статистических методов. *Интенсификация производства сборного железобетона*: межвуз. сб. научн. тр. ХИИТ. 1990. № 13. С. 51–57.
9. Систематизація пошкоджень залізобетонних плит безбаластного полотна залізничних мостів / А. А. Плугін, О. А. Забіяка, С. В. Мірошніченко, Г. О. Линник, А. І. Бабенко. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2009. № 109. С. 120–131.
10. Плугин А. Н., Калинин О. А., Либенко Ю. П. Особенности структурных характеристик бетона  $\alpha$  и  $\mu$ . *Интенсификация производства сборного железобетона*: межвуз. сб. научн. тр. ХИИТ. 1990. № 13. С. 62–71.
11. Калинин О. А. Совершенствование состава и структуры бетона для повышения трещиностойкости железобетонных изделий: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / ХДТУБА. Харків, 1996. 20 с.
12. Пат. 62613 UA Спосіб визначення складу високоміцного, тріщиностійкого і водонепроникного бетону. А. М. Плугін, О. А. Калінін, С. В. Мірошніченко, А. А. Плугін, С. М. Кудренко, В. А. Лютий, А. В. Никитинський, І. В. Подтележнікова, Г. О. Линник, М. Д. Костюк, В. О. Яковлев. *УкрДАЗТ*. Заявл. 15.04.2003, № 2003043396. Опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6.
13. Плугін А. А., Романенко О. В., Яковлев В. О. Обґрунтування скорочення енерговитрат при тепловологісній обробці залізобетонних шпал. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2009. № 109. С. 38–56.
14. Романенко О. В., Плугін А. А., Яковлев В. О. Уточнення оптимальної витрати добавки суперпластифікатора при виробництві залізобетонних шпал без тепловологісної обробки. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2010. № 115. С. 97–103.
15. Развитие теоретических представлений о ранней прочности цементного камня и бетона и механизме формирования их первичной структуры / А. В. Романенко, А. А. Плугин, А. Н. Плугин, О. А. Калинин, Ал. А. Плугин. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. 59 (5/10). С. 28–32.
16. Вплив добавок суперпластифікаторів і прискорювачів твердіння на кінетику набору міцності цементним каменем / А. А. Плугін, О. В. Романенко, О. А. Калінін, О. А. Плугін, О. В. Афанасьєв. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2015. 1130 (21). С. 14–22.
17. Reducing of energy intensity of concrete sleepers production using superplasticizer sand hardening accelerators / A. A. Plugin, A. N. Plugin, O. A. Plugin, O. V. Romanenko, O. A. Kalinin, S. V. Miroshnichenko, A. I. Babii, N. M. Partala. 19 Ibausil, Weimar, 2, 2015. 1125–1133.
18. Пат. 99426 UA Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон. Плугін А. А., Плугін А. М., Романенко О. В., Плугін О. А., Калінін О. А., Плугін Д. А., Мірошніченко С. В.; *УкрДАЗТ*. Заявл. 14.12.2011. Заявка № а 2011 14838. Опубл. 10.08.2012. Бюл. № 15.
19. Склади бетону з добавками суперпластифікаторами і прискорювачами твердіння для виробництва залізобетонних шпал без пропарювання / А. А. Плугін, О. В. Романенко, А. І. Бабій, О. А. Калінін, О. А. Плугін. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2015. 155. С. 62–72.
20. Plugin A. A., Runova R. F. Bonding Calcium Chloride and Calcium Nitrate into Stable Hydration Portland Cement Products: Stability Conditions of Calcium Hydrochloraluminates and Calcium Hydronitroaluminates. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 36, 201869-73. DOI:10.4028/www.scientific.net/JERA.36.69.
21. Серенко А. Ф., Петрова Т. М. Беспропарочная технология производства подрельсовых конструкций / Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. Москва, 2012. 136 с.

22. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Kruts T., Horpynko O., Geviuk I. Design of rapid hardening quaternary zeolite-containing Portland-composite cements. *Key Engineering Materials*. 761 (2018). P. 193-196. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.761.193.
23. Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Y. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 84 (6/6), P. 50–57.
23. Дворкін Л. Й., Лушнікова Н. В., Рунова Р. Ф., Троян В. В. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах. Київ: КНУБА, 2007. 216 с.
24. Кривобородов Ю. Р., Еленова А. А. Применение микродисперсных добавок для ускорения твердения цемента. *Строительные материалы*. 2016. № 9. С. 65–67.
25. Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Y. Nanomodified Portland cement compositions with alkaline activation. *Budownictwo o zoptymalizowanym potenciale energetycznym: Praca zbiorowa*. 2016. 2(18). С. 119–128.
26. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucinska T., Rykhlytska O. Development of nanomodified rapid hardening clicker-efficient concretes based on Portland-composite cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 100 (4/6). P. 38–48.
27. Досвід експлуатації залізобетонних шпал з пружними рейковими скріпленнями, розробленими в УкрДАЗТ / А. М. Пługін, А. А. Пługін, Ю. Л. Тулей, С. В. Мірошніченко та ін. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2014. 148 (2). С. 92–103.
28. Plugin A. A., Miroschnichenko S. V., Lobiak O. V., Kalinin O. A., Plugin D. A. Crack resistance of reinforced-concrete sleepers with elastic rail fastening systems without base-plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1002 (1) (2020) 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/1002/1/012010.
29. Вплив корозії бетону від взаємодії лугів цементу з реакційно здатними заповнювачами на пошкодження залізобетонних шпал у колії / А. А. Пługін, О. П. Крикун, В. В. Зінченко, О. С. Борзяк, О. А. Дудін. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2021. № 196. С. 43–57.
30. Аналіз складів бетону для виготовлення залізобетонних шпал на заводах ЗБШ України / О. В. Романенко, О. А. Калінін, О. А. Пługін, А. А. Пługін, А. І. Бабій. *Науковий вісник будівництва*. 2015. 80 (2). С. 144–147.
31. Методика визначення оптимального складу високоміцного, тріщиностійкого та водонепроникного бетону для конструкцій і споруд залізничного транспорту. ЦП-0224 Рекомендації із забезпечення тріщиностійкості плит безбаластного мостового полотна. УкрДАЗТ, ЦП УЗ.
32. СТ СЭВ 4421-83. Защита от коррозии в строительстве. Защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре. Электрохимический метод испытаний.
33. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 (EN 934-2:2001, NEQ) Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови.

---

Пługін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії та транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: (057) 730-10-58. E-mail: aaplugin@gmail.com.

Калюжна Олена Вячеславівна, аспірант кафедри залізничної колії та транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-5371-7502.

E-mail: kaliuzhna.el@gmail.com.

Борзяк Ольга Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій і споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936.

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

Пługін Олексій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039.

E-mail: pluhin\_bmg@kart.edu.ua.

---

Савченко Олександр Михайлович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій і споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4610-289X.  
E-mail: savcenkoa285@gmail.com.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), Professor and Head of Railway Tracks And Transport Facilities Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel.: (057) 730-10-58.  
E-mail: aapugin@gmail.com.

Kaliuzhna Olena, postgraduate student, Railway Tracks And Transport Facilities Department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-5371-7502. E-mail: kaliuzhna.el@gmail.com.

Borziak Olga, PhD (Tech). Associate Professor, Department Of Building Materials And Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Pluhin Oleksii, PhD (Tech). Associate Professor., Department Of Structural Mechanics And Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039. E-mail: pluhin\_bmg@kart.edu.ua.

Savchenko Oleksandr, postgraduate student, Department Of Building Materials And Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4610-289X. E-mail: savcenkoa285@gmail.com.

Статтю прийнято 16.06.2021 р.

**ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)**

---

УДК 528.4

**СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕРИТОРІЇ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ ПУНКТАМИ ДЕРЖАВНОЇ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ**

Кандидати техн. наук П. Б. Міхно, І. М. Шелковська, В. І. Козарь,  
канд. геол. наук С. П. Лашко

**CURRENT STATE OF SECURING THE TERRITORY OF POLTAVA REGION BY POINTS OF THE national GEODESIC NETWORK**

PhD (Tech.) P. Mikhno, PhD (Tech.) I. Shelkovska, PhD (Tech.) V. Kozar,  
PhD (Geol.) S. Lashko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248308>

---

***Анотація.** У роботі здійснено аналіз стану планової Державної геодезичної мережі України на території Полтавської області за типами центрів і зовнішніх геодезичних знаків, методами визначення координат. Проведено аналіз забезпеченості території Полтавської області пунктами Державної геодезичної мережі для виконання топографічних знімків в масштабах 1:5000, 1:10000, 1:25000. Запропоновано передбачати заходи з модернізації Державної геодезичної мережі на підставі розрахунку показника регіональної відповідності цієї мережі нормативним вимогам щодо щільності геодезичних пунктів для забезпечення виконання топографічних знімків.*

***Ключові слова:** геодезичний пункт, Державна геодезична мережа, щільність пунктів, Полтавська область.*

***Abstract.** The actual problem of securing the proper functioning of the NGN of Ukraine taking into account regional peculiarities are studied.*

*The analysis of the state of NGN of Ukraine on the territory of Poltava region by types of centers, external geodetic signals, methods of determination of coordinates is carried out in the work. The general problems of functioning of NGN in the territory of Poltava region are established.*

*It is established that in a significant amount of points there are no external geodetic signals. The centers that fix the points of the NGN are represented by more than 40 different types. The centers differ in design and size. Some of them are at the same time is references of leveling II category.*

*It is proposed to plan perspective measures for the modernization of the NGN on the reason of the calculation of indicator of regional compliance of the NGN with regulatory requirements for the density of stations to secure the implementation of topographic surveys. This indicator is calculated as the ratio of the real amount points in the newly created administrative district to the normative amount, and is reflected as a percentage. The normative amount is determined on the basis of the area of the respective area and the normative density of stations for the suitable scale of survey.*

*In case of provision of stations at the level of less than 100 % it is necessary to determine the amount of points required to bring the real density in accordance with the normative. Then the existing NGN needs modernization. Such modernization can be carried out not only in the form of*



*renewal of existing and restoration of lost points, but also through the design and fixation of additional points of the calculated number.*

*The analysis of securing of the territory of Poltava region with NGN points for implementation of topographic survey in scales 1:5000, 1:10000, 1:25000 is carried out. Specific proposals to achieve one hundred percent provision of stations in the Poltava region have been developed. An example of a possible realization of the respective proposals is illustrated by the design scheme of additional stations of the 3 class, developed on the basis of the scheme of the NGN of Ukraine.*

**Keywords:** *station, national geodetic network, density of points, Poltava region.*

**Вступ.** Комплекс питань, пов'язаних із забезпеченням належного стану пунктів Державної геодезичної мережі України (ДГМ) в сучасних умовах набуває особливої актуальності і включає: забезпечення точності виконання геодезичних вимірювань (кутових, лінійних, висотних, супутникових) взаємного положення пунктів під час створення геодезичних мереж; дотримання нормативних вимог щодо геометричних параметрів мереж, створених різними методами, забезпечення надійності функціонування і збереження пунктів, а також відновлення втрачених.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** ДГМ України вітчизняними вченими досліджується в цілому або у межах окремих адміністративно-територіальних утворень [1, 2].

Нормативно-правові, організаційно-технічні проблеми функціонування ДГМ України, методи моніторингу стану геодезичних мереж, пошуку та відновлення втрачених пунктів досліджують М. В. Галярник, Є. Ю. Ільків, О. І. Терещук, І. С. Тревого та інші.

На підставі аналізу опису місцезнаходження значної кількості геодезичних пунктів запропоновано [3] для пошуку втрачених пунктів планово-висотної мережі визначати позначки елементів топографічної прив'язки та застосовувати GNSS-нівелювання та тригонометричне нівелювання.

Для забезпечення повноти інформації про геодезичні пункти та ефективного ведення їх обліку пропонується [4] ввести нову систему нумерації геодезичних пунктів (аналогічно кодуванню інформації у

кадастровому номері земельної ділянки) та використовувати географічні, історичні, геологічні, геофізичні, фізичні, оптичні, геометричні та геодезичні дані.

Результати повномасштабного дослідження стану пунктів ДГМ, вперше проведеного за часів України в 2017–2018 рр. [5], виявили ряд науково-технічних і правових проблем, серед яких найважливішими є: перевищення нормативного часу проведення обстеження в три рази; наявність більше 3 тис. пунктів, які потребують інструментального вишукування; відсутність науково-економічного та нормативно-технічного обґрунтування допустимої кількості втрачених геодезичних пунктів; необхідність правового забезпечення нормального функціонування пунктів ДГМ.

Аналізом стану ДГМ на території Івано-Франківської області [1] встановлено проблеми допуску до місць знаходження геодезичних пунктів, утилізації залишків зруйнованих центрів пунктів, втрати спадкоємності між геодезичними технологіями різних історичних епох.

Дослідження можливості відновлення міських полігонометричних мереж [6] свідчать про доцільність використання для цих цілей сучасних RTK-технологій.

Аналіз закордонних досліджень дав змогу виділити спільні проблеми функціонування державних геодезичних мереж та шляхи їх розв'язання.

Проблеми старіння державної геодезичної мережі, створеної традиційними методами, та необхідності переобчислення координат геодезичних пунктів у різних системах є актуальними і

для деяких країн Європи та Азії. Зокрема, на території Казахстану втрачено 90 % геодезичних пунктів, координати яких визначено в СК-42 [7], що призводить до великих похибок виконання геодезичних робіт в цій системі координат. Актуальним для цієї країни завданням є створення мережі референсних станцій ГНСС.

Перспективними цілями модернізації державної геодезичної мережі Білорусі визначено [8] вдосконалення геодезичної інфраструктури, у т. ч.: створення сучасної гравіметричної мережі, єдиних геодезичних систем відліку з відкритим доступом для усіх галузей економіки та державних відомств.

Існуючих шести пунктів фундаментальної гравіметричної мережі Словенії [9] недостатньо для досягнення необхідної щільності гравіметричних пунктів та забезпечення якісної основи для визначення поверхні геоїда на території країни і переходу на сучасну систему висот. Проект побудови нової гравіметричної мережі на території цієї країни передбачає геологічну оцінку придатності збережених і 28 нових планованих гравіметричних пунктів, проведення тестових гравіметричних вимірювань на існуючих пунктах і порівняння отриманих значень сили тяжіння із попередніми.

Однією із характерних рис геодезичної основи в США [10, 11] є висока щільність пунктів планової та висотної геодезичної мереж (особливо у промислово розвинених районах країни), створених традиційними наземними методами. Проте фізико-географічні особливості розташування деяких пунктів таких мереж та відмінності у системах координат обумовлюють певні складнощі забезпечення необхідної точності під час виконання на них супутникових вимірювань. Ця обставина визначає важливість забезпечення доступу до референсних станцій ГНСС під час виконання геодезичних робіт.

Аналіз літературних джерел [1–11] дає можливість вважати коригування щільності геодезичних пунктів одним із перспективних шляхів вирішення наявних проблем Державної геодезичної мережі в Україні, що потребує проведення відповідних досліджень на регіональному рівні.

Визначення мети та завдання дослідження. Оцінка сучасного стану планової ДГМ України на території Полтавської області.

Для досягнення сформульованої мети потрібно розв'язати такі завдання:

- здійснити аналіз стану планової ДГМ на території Полтавської області у розрізі ліквідованих та новостворених районів;

- обґрунтувати показник для визначення регіональної відповідності ДГМ нормативним вимогам щодо щільності пунктів;

- виконати розрахунок показника регіональної відповідності ДГМ нормативним вимогам щодо щільності пунктів для забезпечення топографічних знімачів в масштабах 1:5000, 1:10000, 1:25000 на території Полтавської області.

**Основна частина дослідження.** Розташовані на території Полтавської області пункти ДГМ, що є невід'ємною складовою частиною планової, висотної та гравіметричної ДГМ України, побудовані переважно за часів СРСР і закріплені на місцевості на підставі вимог нормативно-технічної документації різних років, зокрема: «Основные положения о построении государственной геодезической сети СССР 1954–1961 гг.», «Альбом типов центров и реперов» (1945, 1965). Подальша розбудова існуючої ДГМ в Україні відбувалася згідно із Порядком побудови Державної геодезичної мережі (1998, 2013), Інструкцією про типи центрів геодезичних знаків (ГКНТА-2.01,02-01-93), Порядком обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі (2014) та іншими нормативними актами.

Методика проведених досліджень передбачає статистичний аналіз інформації про стан пунктів ДГМ, що перебуває у відкритому доступі на геопорталі ДГМ України [12]. Як вихідні дані використано: схему ДГМ, технічні характеристики геодезичних пунктів (тип і висота знаку, тип, глибина закладання і схематичний рисунок центру, метод визначення координат) [12], а також площі адміністративних районів (за даними геопорталу адміністративно-територіального устрою України) [13].

Дані, які характеризують фактичний стан пунктів ДГМ, отримані в результаті обстежень стану ДГМ на території Полтавської області, проведених фахівцями НДПГК, а також суб'єктами топографо-геодезичної діяльності в різні роки, останні за часом в 2016–2020 рр. [12]. Водночас, по деяких пунктах геодезична інформація наявна станом на 2005–2010 рр., яку наразі можна вважати застарілою з точки зору нормативно встановленої періодичності проведення обстежень не рідше ніж один раз на 10 років [14].

Результати аналізу даних геопорталу ДГМ щодо пунктів планової мережі на території Полтавської області [12] за типами зовнішніх знаків і центрів, методами визначення координат у розрізі ліквідованих та новостворених адміністративних утворень зведено до табл. 1.

Серед усіх пунктів планової ДГМ на території Полтавської області (табл. 1) вісім пунктів втрачено (центри відсутні або повністю знищені), 10 пошкоджено (зруйновані верхні моноліти, збиті марки тощо), близько половини від загальної кількості пунктів перебуває у задовільному стані (придатному до виконання геодезичних робіт). Щодо сучасного якісного стану іншої половини пунктів інформація відсутня [12]. Тому відповідні пункти потребують обстеження, пошуку (за

необхідності), опису місцезнаходження та сучасного стану. Випадки пошкодження та втрат центрів пунктів ускладнюють пошук вихідних пунктів для виконання топографічних знімань традиційними методами та є одним із чинників невідповідності ДГМ нормативним вимогам [14], а тому в контексті модернізації ДГМ потребують обов'язкового усунення навіть незважаючи на кількісно незначні прояви цього негативного явища.

Більше половини (52 %) від загальної кількості пунктів планової ДГМ на території Полтавської області (1, 2, 3-го класів та постійно діючих станцій глобальних навігаційних супутникових спостережень) закріплені пірамідами [12], 4 % пунктів закріплено сигналами, 1 % – закріплені іншими (табл. 1) типами знаків (переносними знаками, знаками на будівлі, подвійними пірамідами), 43 % – не мають жодного зовнішнього геодезичного знаку.

За даними табл. 1 видно, що більшу частину геодезичних пунктів планової ДГМ (близько 80 %) закріплено центрами типів 1, 1оп, 2, 2оп та 146 (для районів із сезонним промерзанням ґрунтів).

Особливістю закріплення пунктів планової ДГМ на території Полтавської області є те, що частина її пунктів (близько 8 %) закріплена ґрунтовими реперами та горизонтальними марками.

Широке різноманіття інших (табл. 1) типів центрів, горизонтальних марок та реперів (більше 30), що закріплюють на місцевості пункти ДГМ в адміністративних районах Полтавської області, представлене переважно поодинокими пунктами.

Нормальне функціонування ДГМ має передбачати не тільки можливість виконання усіх її завдань завдяки допустимому технічному стану кожного з наявних пунктів, а також і повну відповідність чинним нормативним вимогам щодо параметрів побудови та щільності геодезичних пунктів.

Таблиця 1

Назва новоствореної адміністративно-територіальної одиниці		Назва ліквідованої адміністративно-територіальної одиниці (району, ради)		Кількість загальна		Тип зовнішнього знаку					Типи центрів					Метод визначення координат			
						піра-мїда	без зовнішнього знаку	сигнал	інші	146	1	2оп	2	1оп	інші			лінійно-кутова побудова	супутниковий
Полтавський район	Диканський	26	12	9	5	0	11	0	0	0	0	0	4	15	11				
	Зіньківський	29	12	12	4	0	4	1	2	6	4	19	10	4	10				
	Карлівський	19	10	5	3	1	0	15	0	2	2	15	4	4	10				
	Кобеляцький	41	31	9	0	1	1	7	5	1	23	4	31	10	10				
	Котелевський	24	9	11	4	0	5	12	0	1	1	5	17	7	7				
	Машівський	15	11	4	0	0	0	10	2	1	2	0	11	4	4				
	Новосанжарський	28	12	16	0	0	1	20	0	1	6	0	23	5	5				
	Полтавський	39	13	25	1	0	7	26	0	0	0	6	26	13	13				
	Полтавська міська	10	0	10	0	0	0	2	0	0	0	0	8	0	10				
	Решетилівський	28	21	6	1	0	3	12	1	2	7	3	23	5	5				
	Чутівський	34	12	19	3	0	4	19	0	0	0	11	18	16	16				
	Загалом по новоствореному району	292	143	125	21	2	36	145	9	8	47	48	197	95	95				
	Кременчуцький район	Глобінський	52	37	14	1	0	6	1	30	4	1	10	40	12				
Козельщинський		23	17	6	0	0	3	13	3	1	3	17	6	6					
Кременчуцький		37	9	28	0	0	4	3	3	12	0	18	7	30					
Кременчуцька міська		6	1	5	0	0	0	0	0	1	5	0	0	6					
Горішньоплавнівська міська		3	2	1	0	0	0	1	0	0	0	2	1	2					
Семенівський		34	26	6	0	2	6	0	8	18	0	2	28	6					
Загалом по новоствореному району	154	92	59	1	2	16	8	54	36	3	40	92	62						
Миргородський район	Великобагачанський	39	25	14	0	0	10	4	7	4	6	29	10	10					
	Гадяцький	69	21	42	6	0	11	11	6	9	6	26	50	19					
	Гадяцька міська рада	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
	Лохвицький	47	31	16	0	0	19	1	11	7	1	8	35	12					
	Миргородський	60	35	21	2	0	24	2	12	5	1	16	40	20					
	Миргородська міська	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0					
Шишацький	20	3	17	0	0	2	10	0	1	0	7	9	11						
Загалом по новоствореному району	236	115	111	8	0	66	28	36	27	14	68	164	72						
Лубенський район	Гребінківський	29	13	14	0	2	19	0	4	3	0	3	16	13					
	Лубенський	50	20	26	2	1	15	2	10	13	0	10	24	26					
	Лубенська міська	6	1	2	1	1	0	3	0	0	0	3	1	5					
	Оржицький	36	31	4	0	1	15	0	3	12	0	6	32	4					
	Пирятинський	32	21	10	1	0	16	0	5	3	0	8	23	9					
	Хорольський	36	22	9	3	1	14	0	11	5	0	6	22	14					
Чорнухинський	25	5	20	0	0	10	0	2	10	0	3	20	5						
Загалом по новоствореному району	214	113	85	7	6	89	5	35	46	0	42	138	76						
Разом по області	898	463	388	37	10	207	187	134	118	64	198	593	305						

На наш погляд, планувати заходи щодо модернізації ДГМ України доцільно на регіональному рівні з урахуванням конкретних регіональних умов та можливостей для вдосконалення на підставі аналізу забезпеченості території адміністративно-територіальної одиниці геодезичними пунктами. Відповідний аналіз пропонуємо здійснювати за показником регіональної відповідності ДГМ нормативним вимогам (РВ) щодо щільності пунктів для забезпечення топографічних зніманих за формулою

$$PB = \frac{k}{n} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $k$  – фактична кількість пунктів ДГМ на території реформованої адміністративно-територіальної одиниці (без урахування втрачених);  $n$  – нормативна кількість пунктів ДГМ, яка відповідає нормативній щільності пунктів для забезпечення топографічного знімання у відповідному масштабі, визначеній Порядком побудови Державної геодезичної мережі [15].

У випадку забезпеченості геодезичними пунктами на рівні менше 100 % необхідно визначати кількість пунктів, потрібних для приведення фактичної щільності у відповідність до нормативної. Тоді існуюча ДГМ потребує модернізації.

Враховуючи сутність ДГМ як такої, що має рівномірно покривати всю територію країни, та класифікацію ДГМ, до розрахунку показника регіональної відповідності ДГМ нормативним вимогам щодо забезпечення топографічного знімання [15] мають включатися лише пункти 1, 2 і 3-го класів. До перевизначення та переведення геодезичних пунктів 4 класу, побудованих відповідно до Основних положень про державну геодезичну мережу СРСР 1954–1961 років, у 3 клас, враховувати пункти 4-го класу під час розрахунку такого показника недоцільно.

Згідно з Інструкцією з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000

та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98), [16] пункти мереж згущення 4-го класу, 1 і 2-го розрядів та знімальних мереж доповнюють ДГМ для забезпечення топографічних та кадастрових зніманих у масштабах 1:2000 і більше на територіях населених пунктів та промислових зон.

Нормативно встановлена середня щільність пунктів планової ДГМ на території країни на рівні 1 п. на 30 км<sup>2</sup> повністю відповідає вимогам щодо щільності пунктів для забезпечення топографічних зніманих у масштабах 1:10000, 1:25000 та мінімально допустимим вимогам у випадку топографічного знімання у масштабі 1:5000.

Порядком побудови Державної геодезичної мережі [15] допускається можливість зменшення щільності геодезичних пунктів ДГМ у разі використання супутникових методів знімання, проте алгоритмів обґрунтування такого зменшення не встановлено. Тому за основу при розрахунку показника регіональної відповідності планової ДГМ нормативним вимогам щодо забезпечення топографічних зніманих у масштабах 1:5000, 1:10000, 1:25000 на території окремої адміністративно-територіальної одиниці прийняте значення щільності – 1 п. на 30 км<sup>2</sup>.

Результати аналізу забезпеченості території Полтавської області пунктами планової ДГМ для виконання топографічних зніманих у масштабах 1:5000, 1:10000, 1:25000 зведено до табл. 2.

Загальна кількість пунктів (табл. 2) не враховує втрачені.

Результати розрахунку показника регіональної відповідності планової ДГМ нормативним вимогам щодо забезпечення топографічних зніманих у масштабах 1:5000, 1:10000, 1:25000 для адміністративних районів Полтавської області (табл. 2) свідчать про неповну регіональну відповідність фактичної забезпеченості пунктів планової ДГМ нормативним вимогам. Вочевидь, потрібним є обов'язкове усунення цього недоліку функціонування ДГМ.

Таблиця 2

Аналіз забезпеченості території Полтавської області пунктами ДГМ для виконання топографічних знімачів у масштабах 1:50000, 1:25000, 1:10000 (за даними геопорталів [6, 7])

Назва	Площа, км <sup>2</sup>	Ліквідовані адміністративно-територіальні одиниці					Назва / площа, км <sup>2</sup>	Фактична щільність / фактична кількість пунктів ДГМ, k	Новоутворені адміністративно-територіальні одиниці	Показник РВ, %, формула (1)	Кількість пунктів ДГМ, потрібних для досягнення нормативної щільності
		Кількість пунктів планової ДГМ		УПМ ГНСС	Фактична щільність пунктів ДГМ	Нормативна щільність / кількість пунктів ДГМ, n					
		1 клас	2 клас								
Диканський район	700	1	9	15	0	25	1 п. на 27 км <sup>2</sup>	1 п. на 38 км <sup>2</sup> / 289	80	76	
Зінківський район	1360	2	13	13	0	28	1 п. на 47 км <sup>2</sup>	1 п. на 30 км <sup>2</sup> / 365			
Карлівський район	854	1	6	12	0	19	1 п. на 45 км <sup>2</sup>				
Кобеляцький район	1823	1	13	27	0	41	1 п. на 45 км <sup>2</sup>				
Котелевський район	800	1	8	15	0	24	1 п. на 33 км <sup>2</sup>				
Машівський район	869	0	8	7	0	15	1 п. на 58 км <sup>2</sup>				
Новосанжарський район	1300	1	11	15	0	27	1 п. на 46 км <sup>2</sup>				
Полтавський район	1259	2	11	24	1	38	1 п. на 33 км <sup>2</sup>				
Полтавська міська рада	103	0	2	7	1	10	1 п. на 10 км <sup>2</sup>				
Решетилівський район	1009	0	10	18	0	28	1 п. на 36 км <sup>2</sup>				
Чутівський район	861	2	12	20	0	34	1 п. на 25 км <sup>2</sup>				
Глобінський район	2500	2	20	30	0	52	1 п. на 48 км <sup>2</sup>	1 п. на 38 км <sup>2</sup> / 154	79	41	
Козельницький район	900	1	7	15	0	23	1 п. на 39 км <sup>2</sup>				
Кременчуцький район	1020	1	7	28	0	36	1 п. на 28 км <sup>2</sup>				
Кременчуцька міська рада	92	0	0	6	0	6	1 п. на 15 км <sup>2</sup>				
Горішньоплавнівська міська рада	33,7	0	1	2	0	3	1 п. на 11 км <sup>2</sup>				
Семенівський район	1300	1	13	20	0	34	1 п. на 38 км <sup>2</sup>				
Великобагачанський район	1000	1	11	27	0	39	1 п. на 26 км <sup>2</sup>	1 п. на 27 км <sup>2</sup> / 234	113	0	
Гадяцький район	1595	1	14	53	0	68	1 п. на 23 км <sup>2</sup>				
Гадяцька міська рада	17,78	0	0	0	0	0	0 п. на 18 км <sup>2</sup>				
Лохвицький район	1300	1	14	31	0	46	1 п. на 28 км <sup>2</sup>				
Миргородський район	1530	2	14	44	0	60	1 п. на 26 км <sup>2</sup>				
Миргородська міська рада	19	0	1	0	0	1	1 п. на 19 км <sup>2</sup>				
Шишацький район	790	1	8	11	0	20	1 п. на 40 км <sup>2</sup>				
Гребінківський район	595	1	8	20	0	29	1 п. на 21 км <sup>2</sup>				
Лубенський район	1378	2	19	29	0	50	1 п. на 28 км <sup>2</sup>	1 п. на 26 км <sup>2</sup> / 213	115	0	
Лубенська міська рада	45,6	0	1	5	0	6	1 п. на 8 км <sup>2</sup>				
Оржицький район	1000	1	10	24	0	35	1 п. на 28 км <sup>2</sup>				
Пирятинський район	863,5	2	11	19	0	32	1 п. на 27 км <sup>2</sup>				
Хорольський район	1062	0	9	27	0	36	1 п. на 30 км <sup>2</sup>				
Чорнухинський район	682	1	8	16	0	25	1 п. на 27 км <sup>2</sup>				
Разом	28662	29	279	580	2	890	1 п. на 32 км <sup>2</sup>	1 п. на 32 км <sup>2</sup> / 890	94	117	

На сьогодні шляхами приведення фактичної щільності геодезичних пунктів до нормативної з урахуванням регіональних особливостей ДГМ на території Полтавської області, на наш погляд, є:

1) пошук та обстеження пунктів, щодо яких відсутня інформація про сучасний стан у базі геодезичних даних геопорталу ДГМ України [12];

2) відновлення втрачених, оновлення пошкоджених центрів пунктів;

3) проєктування та закріплення додаткових пунктів планової ДГМ 3-го класу у вигляді вставок у трикутники триангуляції 2-го класу;

4) залучення до планової ДГМ 3-го класу ґрунтових реперів (типів 160, 160 пізн.зн.) та горизонтальних марок (типу 142) на лініях нівелювання I та II класів, які також застосовувалися як центри пунктів під час побудови планової мережі.

Серед існуючих ґрунтових реперів на лініях нівелювання у Полтавській області як центри пунктів 3-го класу потенційно

можна використати 30: у Полтавському районі – 27; у Кременчуцькому районі – 3.

Під час проєктування розвитку планової ДГМ 3-го класу за рахунок закладання нових пунктів або включення реперів нівелювання II класу потрібно враховувати взаємне розташування вже існуючих пунктів 1, 2 і 3-го класів та реперів нівелювання, нормативні вимоги щодо мінімальних відстаней між сусідніми пунктами під час побудови ДГМ 3-го класу [15].

Нові пункти закладати бажано за можливості поблизу сіл, селищ та міст. Як метод визначення координат нових пунктів планової ДГМ доцільно використовувати супутниковий. Вибір типів центрів для закріплення нових пунктів ДГМ 3-го класу має ґрунтуватися типами центрів і реперів пунктів ДГМ, регламентованими Порядком обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі (2014) [14].

Приклад реалізації пропозицій щодо проєктування нових пунктів ДГМ подано на рисунку (на основі схеми ДГМ України [12]).

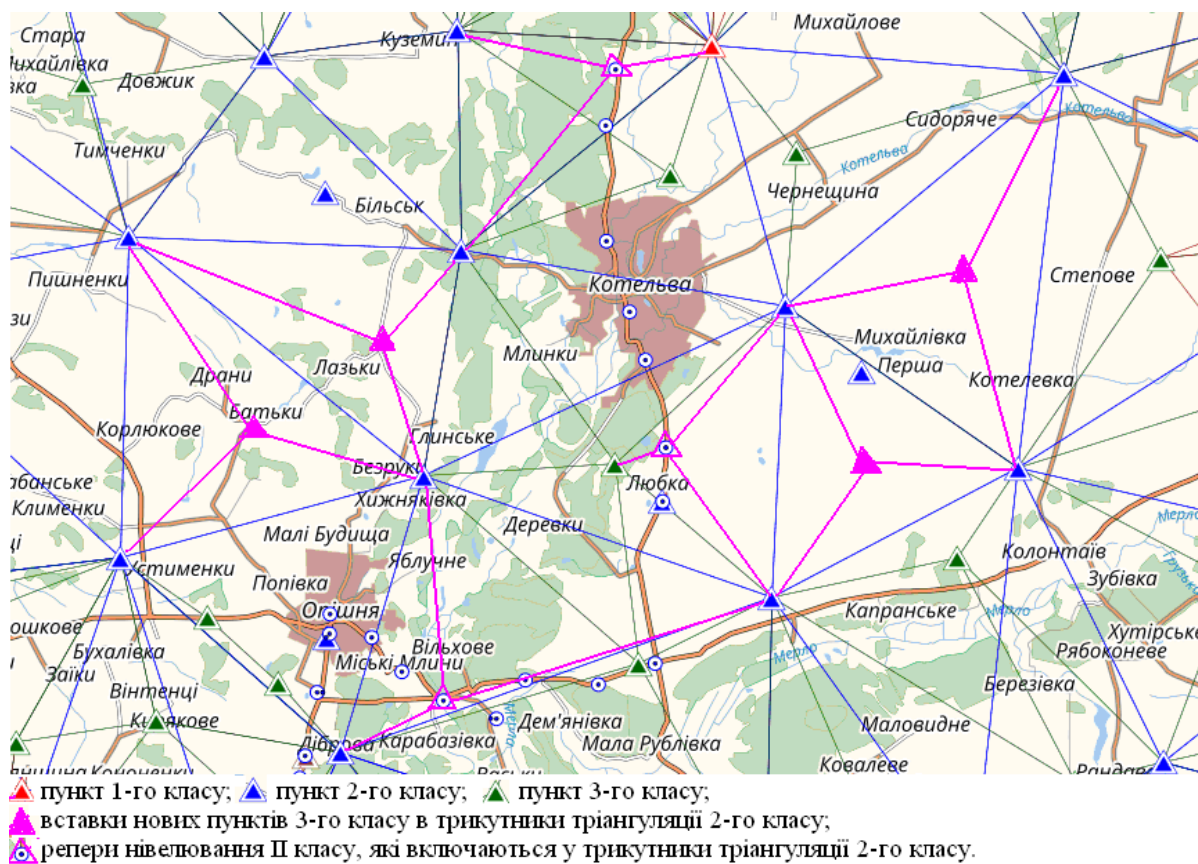


Рис. Схема проєктування нових пунктів планової ДГМ на території Полтавської області

**Висновки.** Проведений аналіз стану планової ДГМ на території Полтавської області виявив суттєву різноманітність центрів пунктів (більше 40 різних типів). Відповідні результати аналогічні результатам обстежень пунктів ДГМ, проведених на території Івано-Франківської області (27 типів центрів) [1]. Регіональною особливістю ДГМ на території Полтавської області є випадки закріплення пунктів, що є одночасно пунктами і планової мережі 1–3 класів, і висотної мережі I і II класів, ґрунтовими реперами та горизонтальними марками. Також встановлено, що в адміністративних районах області мали місце поодинокі випадки пошкодження або втрат центрів пунктів.

Для планування конкретних заходів з модернізації існуючої ДГМ запропоновано показник регіональної відповідності ДГМ нормативним вимогам щодо щільності пунктів для забезпечення виконання топографічних знімків. Пропонований показник відображає ступінь забезпеченості адміністративно-територіальних утворень пунктами ДГМ і розраховується як відношення фактичної кількості пунктів до нормативної. При цьому нормативна кількість визначається залежно від площі конкретного району (або населеного пункту) і нормативної щільності пунктів (1 п. на 30 км<sup>2</sup> для топографічних знімків у масштабах 1:5000, 1:10000, 1:25000).

Виконано розрахунок запропонованого показника для території ліквідованих і новоутворених у процесі адміністративної реформи районів Полтавської області. Визначено, що відповідно до нормативних

вимог щодо кількості пунктів на території області для належного забезпечення виконання топографічних знімків у масштабах 1:5000, 1:10000, 1:25000 не вистачає 117 пунктів.

На підставі аналізу забезпеченості території Полтавської області пунктами ДГМ та їх якісного стану розроблено такі рекомендації з модернізації ДГМ: обов'язкове відновлення восьми повністю втрачених пунктів, оновлення 10 пошкоджених центрів; включення 109 нових пунктів на додаток до існуючих пунктів планової ДГМ 3-го класу. Крім проєктування та закладання нових додаткових пунктів на території Полтавської області можна використати, з урахуванням конкретних умов місцезонашування та сучасного стану, існуючі ґрунтові реperi та горизонтальні марки на лініях нівелювання I і II класу. У перспективі перевизначення та переведення побудованих за часів СРСР пунктів 4-го класу у пункти 3-го класу також дозволить вирішити проблему забезпечення топографічних знімків у масштабах 1:5000, 1:10000, 1:25000 на території Полтавської області. Результати дослідження можна застосовувати для модернізації планової ДГМ України на території Полтавської області. Розроблені науково-практичні рекомендації мають регіональний характер. Практична значимість розроблених пропозицій полягає у тому, що їх втілення розширить геодезичну основу та дасть змогу спростити прив'язку до вихідних пунктів для виконання топографічних знімків у масштабах 1:5000, 1:10000, 1:25000 традиційними методами.

### Список використаних джерел

1. Про стан пунктів ДГМ України в Івано-Франківській області / І. Тревого, Ю. Мязіна, Є. Ільків, М. Галярник. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2019. Вип. I (37). С. 64–68.
2. Тревого І., Зумент І., Дишлик О. Сучасні геодезичні мережі великих міст. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2006. Вип. 1. С. 38–45.
3. Тревого І. С., Ільків Є. Ю., Галярник М. В. Про необхідність визначення висотного елемента місцезнаходження геодезичних пунктів. *Вісник геодезії та картографії*. 2012. № 3(78). С. 4–6.



4. Тревого І., Ільків Є., Галярник М. Кадастр геодезичних пунктів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2014. Вип. II(28). С. 92–95.
5. Тревого І., Ільків Є., Галярник М. Аналіз сучасного стану ДГМ України. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2019. Вип. II (38). С. 54–60.
6. Терещук О., Нисторьяк І., Шульц Р. Відновлення міських полігонометричних мереж сучасними супутниковими технологіями. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2015. Вип. 82. С. 59–72.
7. Система управления сетью референсных станций как элемент опорной геодезической сети в Казахстане / М. М. Молдабеков, Д. И. Еремин, Д. Г. Жаксыгулова, Р. А. Калиева. *Научное обозрение: электрон. журн.* 2020. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-upravleniya-setyu-referentsnyh-stantsiy-kak-element-opornoj-geodezicheskoy-seti-v-kazahstane> (дата звернення: 26.06.2021).
8. Рудницкая Н., Забагонский С. Современное состояние геодезической инфраструктуры в Республике Беларусь и перспективы ее развития. *FIG Working Week*. 2019. Geospatial information for a smarter life and environmental resilience. Hanoi, Vietnam, April 22–26, 2019. URL: [https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2019/ppt/ts04d/TS04D\\_rudnitskaya\\_zabagonsky\\_10204\\_ppt.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2019/ppt/ts04d/TS04D_rudnitskaya_zabagonsky_10204_ppt.pdf) (дата звернення: 26.06.2021).
9. Koler B., Medved K., Kuhar M. Project of the new gravimetric network and test survey in Slovenia. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. 2006. Special issue. P. 31–41.
10. Doyle D. R. Development of the National Spatial Reference System, 1994. URL: [https://www.ngs.noaa.gov/PUBS\\_LIB/develop\\_NSRS.html](https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/develop_NSRS.html) (дата звернення: 26.06.2021).
11. Smith D., Shields R. Preparing to Replace the Official Horizontal and Vertical Datums States: Federal Geospatial Summit on Improving the National Spatial Reference System; Silver Spring, Maryland, 11–12 May 2010. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 2011. Vol. 91. Issue 37. P. 327–328.
12. Державна геодезична мережа України. URL: <https://dgm.gki.com.ua/> (дата звернення: 26.06.2021).
13. Геопортал адміністративно-територіального устрою України. URL: <https://atu.gki.com.ua/ua/karta> (дата звернення: 26.06.2021).
14. Порядок обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі: затв. Наказом Міністерства аграрної політики та продовольства України 03.11.2014 № 435. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text> (дата звернення: 26.06.2021).
15. Порядок побудови Державної геодезичної мережі: затв. Постановою Кабінету міністрів України 07.08.2013 № 646. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#Text> (дата звернення: 26.06.2021).
16. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98): затв. Наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України від 09.04.1998 № 56. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0393-98> (дата звернення: 26.06.2021).

---

Міхно Павло Борисович, кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: 0000-0001-8045-6478. Тел.: +38(068)636-69-03. E-mail: [mikhno1982@gmail.com](mailto:mikhno1982@gmail.com).

Шелковська Інна Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: 0000-0002-0986-381X. E-mail: [selkovskaya291@gmail.com](mailto:selkovskaya291@gmail.com).

---

Козарь Валентин Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: 0000-0003-4084-3507. E-mail: v.kozar@meta.ua.

Лашко Сергій Петрович, кандидат геол. наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: 0000-0001-9146-5687. E-mail: lashkos@sat.poltava.ua.

Mikhno Pavlo, PhD (Tech). Associate Professor, department of geodesy, land management and cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: 0000-0001-8045-6478. Tel. +38(068)636-69-03. E-mail: mikhno1982@gmail.com.

Shelkovska Inna, PhD (Tech.), Associate Professor, department of geodesy, land management and cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: 0000-0002-0986-381X. E-mail: selkovskaya291@gmail.com.

Kozar Valentyn, PhD (Tech). Associate Professor, department of geodesy, land management and cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: 0000-0003-4084-3507. E-mail: v.kozar@meta.ua.

Lashko Serhii, PhD (Geol). Associate Professor, Department of Geodesy, Land Management and Cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: 0000-0001-9146-5687. E-mail: lashkos@sat.poltava.ua.

Статтю прийнято 10.08.2021 р.

УДК 528.9:504

## КАРТОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ ПОШИРЕННЯ ДЕГРАДОВАНИХ ЗЕМЕЛЬ (НА ПРИКЛАДІ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

Канд. геол. наук С. П. Лашко, канд. техн. наук І. М. Шелковська,  
канд. біол. наук Н. П. Гальченко, канд. техн. наук О. М. Клюка

## CARTOGRAPHIC ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF DEGRADED LANDS (ON THE EXAMPLE OF THE POLTAVA REGION)

PhD (Geol.) S. Lashko, PhD (Tech.) I. Shelkovska, PhD (Biol.) N. Halchenko,  
PhD (Tech.) O. Klyuka

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248332>

---

***Анотація.** Подано і проаналізовано районування Полтавської області за показниками сумарного поширення деградованих сільськогосподарських угідь, а також окремо за частками угідь, що зазнали водної, вітрової ерозії, підкислення, засолення. Описано методіку створення картограм з нанесеною на них річковою мережею. Картографічним методом обґрунтовано взаємозв'язок районів підвищеного і мінімального підкислення ґрунтів з певними річковими басейнами. На перспективу рекомендовано використовувати для картографічного аналізу поширення деградованих земель додатково карти гідроізогіпс ґрунтових вод.*

***Ключові слова:** картограма, район, сільськогосподарські угіддя, деградація, ерозія, підкислення, засолення, річковий басейн.*

***Abstract.** Cartographic analysis can be considered as one of the means of the land monitoring system, in particular, by the distribution of degradation processes. The work is proposed to create for regions of cartogram of total distribution of degraded agricultural land and cartograms of fraction of agricultural lands that have undergone water and wind erosion, acidification, salinization, with indispensable drawing on these cartograms of the river network scheme.*

*The zoning of the Poltava region is presented and analyzed in terms of the total distribution of degraded agricultural land, as well as separately by the particles of water, wind erosion, acidification, salinization.*

*According to the relative distribution of degraded agricultural lands (without taking into account the overlap of various types of degradation) within the Poltava region, there are 2 groups of districts of increased land degradation: 1) northern (covers 7 districts – Pyriatyn, Chornukhy, Lubny, Lohvytsia, Myrhorod, Hadiach, Zinkiv) and 2) southeastern (covers 3 districts – Kobeliaky, Novi Sanzhary and Mashivka).*

*Water erosion is inherent in districts with significant difference in heights and largest forest cover. This is primarily Dykanka, Zinkiv, Reshetylivka districts (watershed between rivers of Psel and Vorskla), Lohvytsia and Chornukhy districts (watershed between rivers of Sula and Udai) and the Chutove district (watershed between rivers of Vorskla and Orel). Wind erosion covers predominantly northwestern, north and southeastern districts – Pyriatyn, Chornukhy, Hrebinka, Lohvytsia, Hadiach, Mashivka, Novi Sanzhary.*

*Cartograms of distribution of degraded land are supplemented by the river network on them. The method of their creation is described. The cartographic method is substantiated by the interconnection of the districts of increased acidification of soils with basins of the rivers Udai and Vorskla, and the districts of minimum acidification of soils – with the basin of the river Khorol.*

*Salinization of soils of the Poltava region should be associated, obviously not with superficial, and with groundwater. In the future, it is recommended to use for a cartographic analysis of the distribution of degraded lands additionally maps of groundwater hydroisogyps.*

**Keywords:** *cartogram, district, agricultural lands, degradation, erosion, acidification, salinization, river basin.*

**Вступ.** Україна належить до країн з високим рівнем деградації земель. Так, близько 57,5 % території України охоплено ерозійними процесами, у тому числі 23,7 % і 11,9 % площі сільськогосподарських угідь зазнають водної та вітрової ерозії відповідно. В ЄС схильними до водної та вітрової ерозії вважаються відповідно 12 % і 4,4 % земель [1].

За останніми оцінками [2, рис. 9], без відповідних заходів для боротьби з деградаційними процесами (за традиційним сценарієм обробітку ґрунту) Україна може втратити до 2050 року 12 % свого валового сільськогосподарського продукту та експорту. Щодо країн Західної Європи, навпаки, прогнозується зростання валового сільськогосподарського продукту (за традиційним сценарієм обробітку ґрунту в цих країнах).

Основними причинами деградації земель в Україні визнані такі [1]: забруднення шкідливими речовинами різного походження; погіршення фізичної

або хімічної структури (внаслідок ерозії, природних явищ та ущільнення транспорту); перенасичення сівозмін просапними технічними культурами; недостатня кількість органічних добрив; використання у сільськогосподарському виробництві земель, розташованих на схилах більше 7 градусів.

Нині в Україні, за фінансування Глобального екологічного фонду, впроваджується проєкт ФАО «Інтегроване управління природними ресурсами деградованих ландшафтів лісостепової та степової зон України» з подальшою інтеграцією у глобальну міжнародну моніторингову систему GLOSIS. Одним із завдань цього проєкту є вдосконалення системи моніторингу земель і ґрунтів задля досягнення нейтрального рівня їх деградації. Індикатор «Частка деградованих земель від загальної площі земель» включений до Глобального переліку індикаторів для моніторингу Цілей Сталого Розвитку («Global indicator framework for the

Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development»), схваленого Генеральною асамблеєю ООН (A/RES/71/313) та Статистичною комісією ООН (E/CN.3/2018/2).

Основою світової системи моніторингу земель є ґрунтові інформаційні системи, наприклад Міжнародна цифрова база даних ґрунтів і ландшафтів e-SOTER (глобальна), Ґрунтова база даних Європейського Союзу LUCAS, Ґрунтова інформаційна система Сполучених Штатів Америки NASIS, Ґрунтова інформаційна система Канади CanSIS, Цифрова ґрунтова карта світу GlobalSoilMap. У системі CanSIS [3] передбачені в тому числі карти ризику деградації ґрунту, що показують ризик ерозії вітру, ризик водної ерозії та ризик солінізації [4].

Розвиток ґрунтових інформаційних систем України регулюється законодавчо. Так, ст. 23 Закону України «Про охорону земель» [5] передбачає формування національного, регіональних і місцевих банків даних про стан земель і ґрунтів. Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» [6] визначає відомості про ґрунти базовими геопросторовими даними. Базовим елементом ГІС є карта.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За даними комплексної оцінки якісного стану ґрунтів [7], інтегральний показник стану земельних ресурсів Полтавської області складає 3 бали (середнє значення). Розраховувався він математично, загалом для регіону. Сумнівів щодо інтегрального показника немає, на відміну від трьох його складових – показника стійкості ґрунтів щодо підкислення, показника деградованих сільськогосподарських земель і показника поширення екзогенних геологічних процесів (зсувів), на нашу думку, занижених. Розвіяти сумніви може аналіз у розрізі базових адміністративних утворень, у тому числі за використання картографічних методів.

Картографічний підхід у питанні вивчення агроекологічного стану сільськогосподарських угідь Полтавщини (як агроекологічне районування) розкривають автори роботи [8]. Зонування регіону здійснено за критерієм співвідношення ріллі та екологістабілізуючих територій.

Математико-картографічний підхід до обробки даних моніторингових досліджень ерозійно-небезпечних земель [9] реалізується на Волині через програмний модуль побудови картограм, інтегрований у середовище геоінформаційної системи ArcGIS фірми ESRI.

У Полтавській області геоінформаційний моніторинг задіяний стосовно земель лісгосподарського призначення [10]. У геоінформаційну систему закладено 49 атрибутів, включаючи інформацію про елементи гідрографії. Працездатність системи підтверджена створенням тематичних карт урочища Грабське.

Доцільність використання супутникових даних у системі агроекологічного моніторингу процесів ерозійної деградації ґрунтів (за методологією SWOT і Гар-аналізу) доведена на території трьох природно-кліматичних зон, представлених Чернігівською, Полтавською та Запорізькою областями [11]. Так, за супутниковими даними визначено критичні зони ерозійної деградації орних земель.

**Визначення мети і завдання дослідження.** Метою статті є вивчення просторового поширення деградації сільськогосподарських угідь Полтавської області з використанням картографічного та статистичного аналізів. За основні поставлені такі завдання: складання картограми поширення деградованих сільськогосподарських угідь регіону; картографічний аналіз видів деградації цих угідь (за районами); аналіз взаємозв'язку деградації з природними чинниками. Частина дослідження ґрунтується на попередньо створених картограмах [12].

**Основна частина дослідження.**

Загальна площа сільськогосподарських угідь Полтавської області, що зазнають деградації ерозією, становить 749,2 тис. га [13], або 26,1 % від загальної площі області чи 34,6 % площі сільськогосподарських угідь. При цьому 369,3 тис. га піддаються водній ерозії, а 379,9 тис. га – вітровій.

Примітки. 1. У звіт не внесено землі регіону, що зазнають абразії; вони не використовуються у сільському господарстві і обліковуються окремо, наприклад, землі прибережної частини Кременчуцького водосховища в межах прибережної охоронної зони [14]. 2. При створенні картограм районування території проводили відповідно до Публічної кадастрової карти України ([https://map.land.gov.ua/?cc=3843265.22899421,6379002.643065024&z=9&l=kadastr&bl=dzk\\_overview](https://map.land.gov.ua/?cc=3843265.22899421,6379002.643065024&z=9&l=kadastr&bl=dzk_overview)), як більш наочне (більш

подрібнене [15]) порівняно з нинішнім адміністративно-територіальним устроєм.

Водна ерозія ґрунту зазвичай пов'язана з рельєфом. Не є винятком і Полтавська область. Так, найменша частка сільськогосподарських угідь, що зазнають водної ерозії, характерна для районів Лівобережної (нижньої) частини області та Котелевського району (рис. 1, а), а найбільша частка водної ерозії притаманна районам зі значними перепадами висот і підвищеним залісненням (це насамперед Диканьківський, Чорнухинський, Лохвицький райони). Остання особливість не викликає подиву, враховуючи належність території Полтавської області до Східноукраїнської лісової водоохоронної провінції, з найвищою часткою водоохоронної лісистості серед регіонів України – 69,9 % [16].

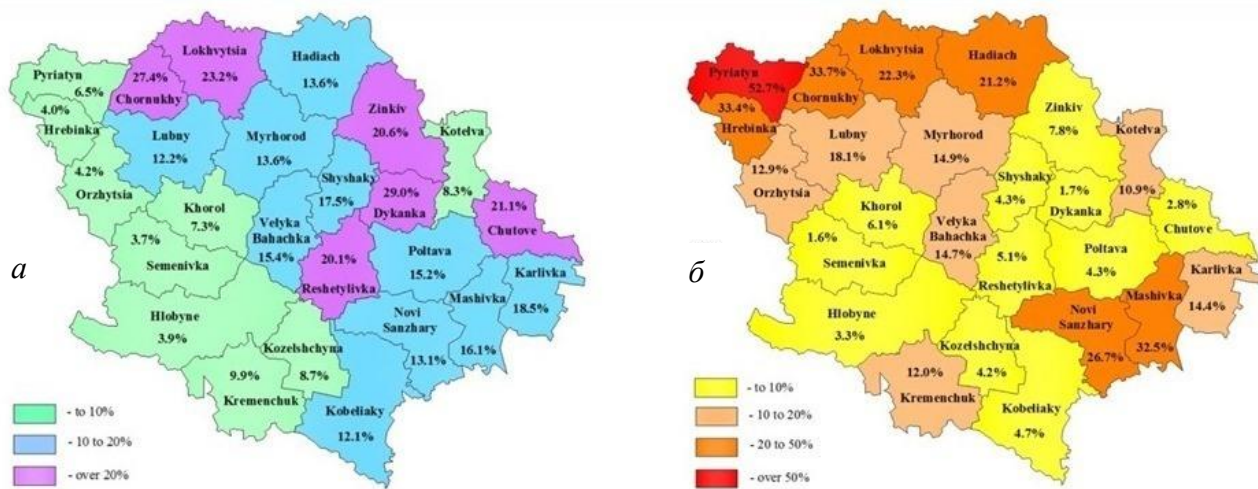


Рис. 1. Картограми стану деградації сільськогосподарських угідь за районами Полтавської області, % [12]: а – водна ерозія; б – вітрова ерозія (темними кольорами – вищі значення показників)

Найбільш деградованими внаслідок вітрової ерозії є північно-західні, північні та південно-східні райони (рис. 1, б) – Пирятинський, Чорнухинський, Гребінківський, Лохвицький, Гадяцький, Машівський, Новосанжарський. Тут залежність від рельєфу не простежується. Райони з

найнижчою часткою вітрової ерозії розташовані у середній частині області смугою з північного сходу на південний захід.

Сільськогосподарські угіддя Полтавщини також деградує внаслідок підкислення та засолення. Загалом у регіоні підкислені 787,9 тис. га сільськогосподар-

ських угідь, а засолені – 207,9 тис. га [13], або 27,4 % та 7,2 % від загальної площі області чи 34,4 % та 9,6 % від площі сільськогосподарських угідь відповідно. Загальний розподіл деградованих

сільськогосподарських угідь у межах Полтавської області (за сумарним показником чотирьох основних видів деградації – водна та вітрова ерозія, підкислення, засолення) демонструє рис. 2.

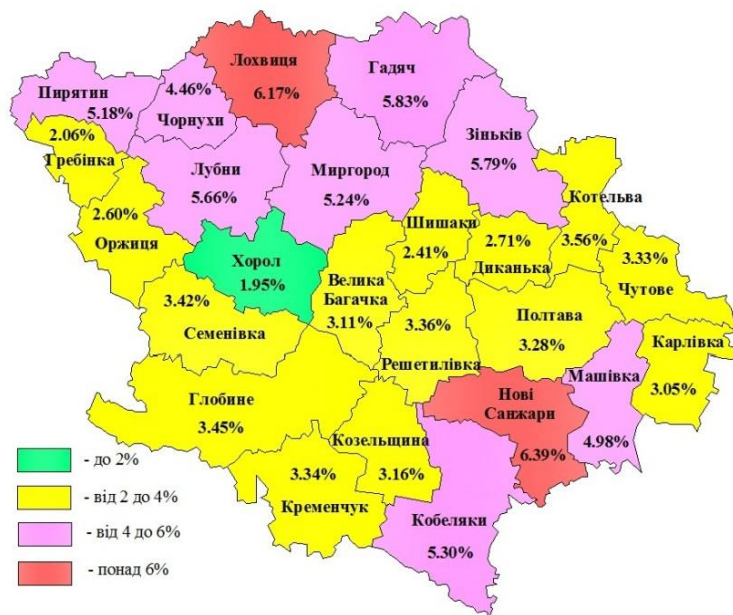


Рис. 2. Картограма поширення деградованих сільськогосподарських угідь Полтавської області (водна та вітрова ерозія + підкислення + засолення)

Чітко простежується підвищена деградація земель північних (7) і південно-східних (3) районів області, з максимальною концентрацією деградованих сільськогосподарських угідь області (6,17 % і 6,39 % за площею) у межах Лохвицького та Новосанжарського районів. Мінімальною деградацією (менше 2 % площі сільськогосподарських угідь області) характеризується територія Хорольського району. При цьому лише за одним показником (часткою підкислених ґрунтів [12, Fig. 4]) Хорольський район є найбільш стійким серед районів області.

Як один із чинників на ступінь деградації земель впливає діяльність поверхневих вод. Для картографічного аналізу цього чинника на картограми деградації земель Полтавської області наклали схему річкової мережі, запозичену з офіційного сайту

Регіонального офісу водних ресурсів у Полтавській області (<https://poltavavodgosp.gov.ua/vyznachennia-masyviv-poverkhnevyykh-ta-pidzemnykh-vod/>). Попередньо у програмі Paint.NET виділили (підняли) жирними лініями русла основних річок регіону (рис. 3, River network) – Сули (з її правою притокою Удаєм), Псла (із правою притокою Хоролом), Ворскли та Орелі (південно-східна межа області); замінили білий фон рисунка прозорим; зберегли рисунок у форматі .PNG. Надалі, за певної кількості спроб, підібрали необхідний масштаб схеми річкової мережі та звели рисунки в накладені пари (рис. 3). Створену таким чином картограму частки підкислених сільськогосподарських угідь, зокрема з нанесеною на неї річковою мережею, відображає рис. 4.

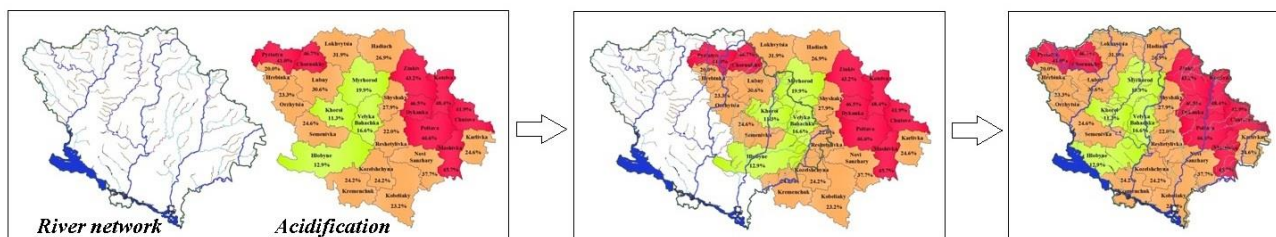


Рис. 3. Приклад накладання схеми річкової мережі (*River network*) на картограму підкислення сільськогосподарських угідь (*Acidification*)

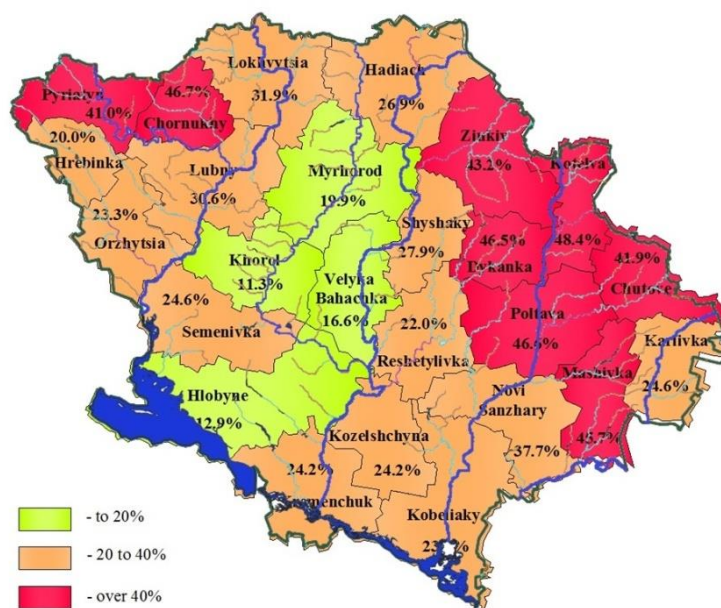


Рис. 4. Вигляд картограми часток підкислених сільськогосподарських угідь за районами Полтавської області з нанесеною на неї річковою мережею

Чітко простежується підвищене підкислення ґрунтів у двох районах північно-західної частини Полтавської області (басейн річки Удаї) та у шести районах східної частини області, що розташовані в басейні річки Ворскла (рис. 4). Найменш підкислені території Полтавщини пов'язані з басейном річки Хорол (Миргородський, Хорольський, Великобагачанський, Глобинський райони).

Картограми водної та вітрової ерозії, а також засолення ґрунтів менш інформативні у плані кореляції з річковою мережею. Проте можна принаймні стверджувати, що в межах Полтавської області підвищеною

водною еродованістю характеризуються межиріччя Сули з Удаєм, Псла з Ворсклою у верхній частині та Ворскли з Ореллю у верхній частині.

Засолення ґрунтів Полтавської області потрібно пов'язувати, вочевидь, не з поверхневими, а з підземними ґрунтовими водами. Загалом перевищення частки засолення ґрунтів у 10 % спостерігається у восьми районах області [12, Fig. 5] (Кобеляцький, Козельщинський, Котелевський, Кременчуцький, Лубенський, Миргородський, Новосанжарський, Семінівський райони). При цьому Козельщинський район значно вирізняється

засоленими ґрунтами – 23,4 % площі сільськогосподарських угідь, що у 2,4 рази перевищує середній показник по області.

**Висновки.** Картографічний аналіз можна розглядати як один із засобів системи моніторингу земель, зокрема за поширенням деградаційних процесів. Як обов'язкові картограми пропонується створення для регіонів картограми сумарного поширення деградованих сільськогосподарських угідь та картограм

часток сільськогосподарських угідь, що зазнали водної, вітрової ерозії, підкислення, засолення, з неодмінним нанесенням на ці картограми схеми річкової мережі.

У подальших дослідженнях для картографічного аналізу деградованих земель разом зі схемою річкової мережі рекомендується залучити карти гідроізогіпс підземних ґрунтових вод, необхідні для вивчення питань щодо засолення ґрунтів, а можливо, й підкислення.

### Список використаних джерел

1. Будзьяк О. С., Будзьяк В. М. Екологізація землекористування в контексті євроінтеграційних процесів. *Інвестиції: практика та досвід*. 2018. № 11. С. 5–11.
2. Calzadilla A., Carr T. Land degradation and food security: water erosion impacts and adaptation options. *Global Economic Analysis Beyond 2020: 23rd Annual Conference on Global Economic Analysis (online)*, 17–19 June 2020. P. 1–24. URL: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/events/Conferences/2020/index.aspx> (дата звернення: 04.09.2021).
3. Canadian Soil Information Service: офіційний сайт. URL: <https://sis.agr.gc.ca/cansis/> (дата звернення: 04.09.2021).
4. Soil Degradation Risk (maps of Wind Erosion Risk, Water Erosion Risk, Soil Salinity) / Canadian Soil Information Service. URL: <https://sis.agr.gc.ca/cansis/publications/maps/index.html> (дата звернення: 04.09.2021).
5. Про охорону земель: Закон України від 19.06.2003 р. № 962-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text> (дата звернення: 04.09.2021).
6. Про національну інфраструктуру геопросторових даних: Закон України від 13.04.2020 р. № 554-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text> (дата звернення: 04.09.2021).
7. Рибалова О. Оцінка якісного стану ґрунтів та земельних ресурсів Полтавської області. *Current trends in the development of science and practice: XXI International Scientific and Practical Conference*, 15–16 June 2020. Haifa, Israel. P. 206–211. ISBN 978-1-64871-427-6.
8. Pysarenko P. V., Laslo O. O., Pankova O. V. Agro-ecological territories zoning for the cultivation of organic agricultural products. *Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету*. 2017. № 4(46), С. 30–33.
9. Король П. П., Волошин В. У., Рудик О. В. Математико-картографічне забезпечення моніторингових досліджень ерозійно-небезпечних земель із застосуванням анаморфованих зображень. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. Вип. 76. 2012. С. 110–116.
10. Halchenko N. P., Lashko S. P., Stoiko N. Ye., Kozar V. I., Kozar L. M., Kliuka O. M. Creation of a database of geoinformation monitoring of forestry lands (southwest part of Poltava region, Ukraine). *Geoinformatics: Conference Proceedings / European Association of Geoscientists & Engineers*, May 2021, Volume 2021, P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521131>.
11. Tarariko O. H., Iliencko T. V., Kuchma T. L., Novakovska I. O. Satellite agroecological monitoring within the system of sustainable environmental management. *Agricultural Science and Practice*. 2019. Vol. 6. No 1. P. 18–27.



12. Lashko S. P. Peculiarities of spreading of degraded agricultural lands in the territory of Poltava region (Ukraine). *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: Conference Proceedings, XIV International Scientific Conference / European Association of Geoscientists & Engineers*, Nov. 2020, Vol. 2020. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056013>.

13. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Полтавській області у 2019 році / Департамент екології та природних ресурсів Полтавської обласної державної адміністрації. Полтава, 2020. С. 78–87. URL: [https://mepr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2019/Полтавська\\_область.pdf](https://mepr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2019/Полтавська_область.pdf) (дата звернення: 04.09.2021).

14. Шелковська І. М. Шляхи використання земельних ресурсів прибережних територій Кременчуцького водосховища. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2015. Вип. 2(91). С. 170–175.

15. Лашко С. П., Шелковська І. М. Картографія. Лекційний курс: навч. посіб. Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид», 2016. С. 133–138. ISBN 978-617-7294-56-5.

16. Лашко С. П. Структурно-територіальні пріоритети оптимальної лісистості в Україні. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. 2009. Вип. 2/2009 (55). Ч. 1. С. 101–104.

---

Лашко Сергій Петрович, кандидат геол. наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: 0000-0001-9146-5687. Тел.: +38(050) 700-81-39. E-mail: [lashkos@sat.poltava.ua](mailto:lashkos@sat.poltava.ua).

Шелковська Інна Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: 0000-0002-0986-381X. E-mail: [selkovskaya291@gmail.com](mailto:selkovskaya291@gmail.com).

Гальченко Надія Павлівна, кандидат біол. наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: 0000-0003-2659-177X. E-mail: [nadinGal9@gmail.com](mailto:nadinGal9@gmail.com).

Клюка Олена Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: 0000-0002-9250-1157. E-mail: [klyukalena@gmail.com](mailto:klyukalena@gmail.com).

Lashko Serhii, PhD (Geol.). Associate Professor, Department of Geodesy, Land Management and Cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: 0000-0001-9146-5687. Тел.: +38(050) 700-81-39. E-mail: [lashkos@sat.poltava.ua](mailto:lashkos@sat.poltava.ua)

Shelkovska Inna, PhD (Tech.). Associate Professor, Department of Geodesy, Land Management and Cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: 0000-0002-0986-381X. E-mail: [selkovskaya291@gmail.com](mailto:selkovskaya291@gmail.com)

Halchenko Nadiia, PhD (Biol.). Associate Professor, Department of Geodesy, Land Management and Cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: 0000-0003-2659-177X. E-mail: [nadinGal9@gmail.com](mailto:nadinGal9@gmail.com)

Klyuka Olena, PhD (Tech.). Associate Professor, Department of Geodesy, Land Management and Cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: 0000-0002-9250-1157. E-mail: [klyukalena@gmail.com](mailto:klyukalena@gmail.com)

Статтю прийнято 31.08.2021 р.

УДК 620.22

ОПАНУВАННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СИНТЕЗУ  
ОКСИДНИХ СПОЛУК ЗІ СТРУКТУРОЮ ПІРОХЛОРИ

Канд. техн. наук В. О. Чишкала, доктори техн. наук С. В. Литовченко, Е. С. Геворкян,  
канд. техн. наук В. П. Нерубацький, аспіранти Б. О. Мазілін, О. М. Морозова

MASTERING AND MODERNIZATION OF PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES OF  
SYNTHESIS OF OXIDE COMPOUNDS WITH STRUCTURE OF PYROCHLORINE

PhD (Tech.) V. O. Chyshkala, Dr. Sc. (Tech.) S. V. Lytovchenko, Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkyan,  
PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, postgraduate B. O. Mazilin, postgraduate O. M. Morozova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248097>

***Анотація.** Досліджено процеси синтезу, структурні характеристики і структурно-фазові процеси в багатокомпонентних металокерамічних оксидних матеріалах, фізико-хімічні механізми процесу синтезу багатоелементних оксидних сполук  $Y_2Zr_2O_7$  зі структурою пірохлору при консолідації і спіканні оксидів ітрію та цирконію, механізми формування та еволюції структури отриманих матеріалів, структурно-фазові характеристики матеріалів з різним хімічним складом. Досліджено структурно-фазову еволюцію при синтезі нових речовин та консолідації сполук системи  $Y_2O_3-ZrO_2$ . Отримано зразки оксидних спеків з часткою пірохлорної фази  $Y_2Zr_2O_7$  до 41 %. Встановлено, що кінетика збільшення частки пірохлорної фази в зразках свідчить про бажане підвищення активності хімічної реакції, чого можливо досягти підвищенням температури синтезу до температур утворення евтектики або збільшенням реакційної поверхні порошків.*

***Ключові слова:** багатокомпонентні оксиди, пірохлори, ультра- та нанодисперсні порошки, консолідовані матеріали, компактування, спікання.*

***Abstract.** Modern scientific and technological development of society, further intensification of production together with the provision of proper safety of human life and preservation of the environment necessitate the search for new solutions in the creation of new materials and technologies. The creation of effective materials for the latest and future technologies and technical devices is based on new scientific data on the definition and analysis of specific mechanisms of physicochemical processes that implement the desired structural and phase state of solids with the desired set of properties. In recent decades, the most effective way to control the properties of solid materials is the use of nanotechnology and nanomaterials, which have recently been increasingly used in almost all areas of new technologies.*

*The article investigates synthesis processes, structural characteristics and structural-phase processes in multicomponent metal-ceramic oxide materials, physicochemical mechanisms of synthesis of multielement oxide compounds  $Y_2Zr_2O_7$  with pyrochlor structure during consolidation and sintering of yttrium and zirconium oxides, structure formation -phase characteristics of materials with different chemical composition. The structural-phase evolution in the synthesis of new substances and the consolidation of compounds of the  $Y_2O_3 - ZrO_2$  system have been studied. Samples of oxide heat with the proportion of pyrochlorine phase  $Y_2Zr_2O_7$  up to 41 % were obtained. It is*

*established that the kinetics of increasing the proportion of pyrochlorine phase in the samples indicates a desirable increase in the activity of the chemical reaction, which can be achieved by increasing the synthesis temperature to the temperatures of eutectic formation or increasing the reaction surface of powders.*

**Keywords:** *multicomponent oxides, pyrochlores, ultra- and nanodisperse powders, consolidated materials, compaction, sintering.*

**Вступ.** Сучасний науково-технологічний розвиток суспільства, подальша інтенсифікація виробництва разом з забезпеченням належної безпеки життєдіяльності людей і збереження довкілля зумовлюють необхідність пошуку нових рішень при створенні нових матеріалів і технологій. Створення ефективних матеріалів для новітніх та майбутніх технологій і технічних пристроїв базується на нових наукових даних визначення та аналізу конкретних механізмів фізико-хімічних процесів [1, 2], що реалізують потрібний структурно-фазовий стан твердих тіл з бажаним комплексом властивостей. В останні десятиліття найефективнішим шляхом керування властивостями твердотільних матеріалів є застосування нанотехнологій та наноматеріалів, які останнім часом все активніше застосовуються практично у всіх сферах новітніх технологій [3, 4].

Суттєвою перешкодою для впровадження новітніх матеріалів є недостатня база фундаментальних даних та результатів практичних експериментальних досліджень про чутливість як взагалі твердотільних об'єктів, так і композитних дисперсно зміцнених матеріалів зокрема до радіаційного, корозійного, термічного впливу, що ініціює розвинення дефектів та обумовлює перехід атомарної структури до нового стану. Окремі варіанти таких процесів розглянуто в роботах [5, 6]. Вагомими є дослідження можливості використання керамічних оксидних нанопорошків для зміцнення конструкційних матеріалів [7, 8], хоча досі залишаються невирішеними проблеми, що виникають як при отриманні цих сталей [9] та керамічних нанопорошків для них [9, 10],

так і при оптимізації їхнього структурно-фазового стану [11].

Створення, удосконалення чи застосування перспективних сучасних та революційних майбутніх технологічних процесів базується на наявності матеріалів з певним рівнем заданих властивостей і зберіганням цих властивостей на належному рівні під руйнівною дією низки зовнішніх факторів. Знання та розуміння фундаментальних загальнофізичних закономірностей утворення та еволюції структури твердих тіл від макро- до нанорівня є невід'ємною складовою при створенні нових чи удосконаленні відомих матеріалів для реалізації у них нових, раніше недосяжних характеристик.

Для традиційних однорідних матеріалів максимально можливі фізичні властивості (механічні, термічні, корозійні, радіаційні та інші) вже практично реалізовані. Отримати новий рівень особливих, конкретно обумовлених властивостей можливо у матеріалах нової структурної будови, які здебільшого є структурно неоднорідними. В таких матеріалах властивості та експлуатаційні можливості залежать як від окремих складових, так і від загальних структурно-фазових композиційних характеристик. Сьогодні більшість матеріалів, що створюються для експлуатації в екстремальних умовах комплексної дії низки руйнівних факторів (корозії, опромінення, температури, механічних навантажень), є саме такими об'єктами. Це, безперечно, стосується і перспективних матеріалів сучасної ядерної галузі та насамперед матеріалів для майбутніх ядерних та термоядерних пристроїв.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Об'ємні матеріали з ультра- чи

нанодисперсною мікроструктурою можна отримувати як безпосередньо з кристалічних або аморфних твердих тіл, так і методами порошкової технології, яка передбачає попереднє диспергування матеріалів різними способами та за необхідності – їхню наступну консолідацію для реалізації бажаних властивостей. Дисперсні матеріали і без консолідації та компактування можуть бути складовими композитів металевої та неметалевої природи для забезпечення спеціальних властивостей матеріалів [12], зокрема для дисперсійного зміцнення [13].

Робота продовжує дослідження, виконані авторами в попередні роки, і базується на результатах та науковому доробку, частково опублікованих у роботах [14, 15]. Визначення особливостей синтезу складних багатоелементних оксидів на базі простих подвійних сполук (звичайних оксидів перехідних металів) є першим кроком у визначенні фізичних закономірностей створення певних структурно-фазових станів твердотільних композитів з новим комплексом властивостей, що забезпечуються цими станами (корозійної та радіаційної стійкості, жаро- та термостійкості, міцності) [16, 17].

Наступний етап – опанування можливостей корегуванням технологічних факторів керувати різномасштабними елементами структури твердотільних матеріалів, визначати оптимальну для певних умов використання будову матеріалів та реалізовувати її шляхом певних технологічних прийомів. Кінцевим результатом має бути розробка методів керованого впливу на структурно-фазовий стан матеріалів, що надасть можливість спрямовано отримувати матеріали з підвищеними та наперед заданими експлуатаційними властивостями.

Цирконій належить до рідкісних металів, причому це єдиний метал з цієї групи, світове споживання якого становить сотні тисяч тонн. Більше 85 % виробленої цирконієвої сировини використовується у

формі природного мінералу циркону, що містить 65...66 %  $ZrO_2$ . Цирконовий концентрат (речовина, де вже 98...99 % циркону) широко застосовується у виробництві будівельної і санітарно-технічної, технічної кераміки, вогнетривів, ливарному виробництві. Близько 10 % циркону піддається переробці для отримання безпосередньо діоксиду цирконію та його сполук, 5 % припадає на метал і сплави [18].

Матеріали на основі діоксиду цирконію є дуже перспективними для застосування у різних галузях науки, техніки та технологій. Такі матеріали широко використовуються при отриманні вогнетривких виробів, високотемпературних нагрівачів, жаростійких емалей, тугоплавкого скла, різних видів кераміки, керамічних пігментів, твердих електролітів, термозахисних покриттів, каталізаторів, штучних дорогоцінних каменів і абразивних матеріалів. Останніми роками діоксид цирконію почав широко застосовуватися у волоконній оптиці, виробництві напівпровідників та іншої спеціальної кераміки для електроніки, а також у медицині при виготовленні медичного інструменту, штучних тазостегнових суглобів, стоматологічних протезів. Значно поширилися сфери використання діоксиду цирконію в машинобудуванні (гальмівні диски, різальний інструмент) та ракетно-космічній техніці, в ядерно-фізичних технологіях та нових елементах електронних пристроїв [19].

Діоксид цирконію був відкритий ще у 1789 році, а його поліморфізм – у 1929 році [20]. Відомо, що чистий діоксид цирконію утворює три кристалічні модифікації: низькотемпературну моноклінну ( $\alpha$ -фаза, просторова група  $P2_1/C$ , параметри ґратів  $a = 5,169 \text{ \AA}$ ,  $b = 5,232 \text{ \AA}$ ,  $c = 5,341 \text{ \AA}$ , об'єм елементарної комірки  $144,44 \text{ \AA}^3$ ), проміжну тетрагональну ( $\beta$ -фаза, просторова група  $P42/nmc$ , параметри ґратів  $a = b = 3,629 \text{ \AA}$ ,  $c = 5,297 \text{ \AA}$ , об'єм елементарної комірки  $69,76 \text{ \AA}^3$ ), високотемпературну кубічну ( $\gamma$ -фаза, просторова група  $Fm\bar{3}m$ , параметри

ґратів  $a = 5,139 \text{ \AA}$ , об'єм елементарної комірки  $135,62 \text{ \AA}^3$ ). Зазначені кристалічні структури зберігають свою стабільність у певних температурних інтервалах.

Таким чином, з проведеного огляду можна зробити висновок, що питання синтезу багатоеlementних оксидних сполук  $Y_2Zr_2O_7$  зі структурою пірохлору є невирішеним.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження процесів синтезу, структурних характеристик, а також структурно-фазових процесів у багатокомпонентних металокерамічних оксидних матеріалах, фізико-хімічних механізмів процесу синтезу багатоеlementних оксидних сполук  $Y_2Zr_2O_7$  зі структурою пірохлору при консолідації і спіканні оксидів ітрію та цирконію, опанування та модернізація фізико-хімічних процесів синтезу оксидних сполук зі структурою пірохлору.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- для синтезу оксидних сполук зі структурою пірохлору використати спосіб змішування промислових оксидів цирконію та ітрію, а також знайти метод, що дозволить би значно підвищити температуру синтезу суміші оксидів до плавлення;

- удосконалити процес синтезу при плавленні, підвищити його ефективність;

- дослідити можливості синтезу пірохлору  $Y_2Zr_2O_7$  термічним розкладанням нітратів ітрію при  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  в атмосфері кисню (без азоту).

**Основна частина дослідження.**

Кубічна модифікація  $ZrO_2$  (структура типу флюориту) є стабільною до температури плавлення  $2870 \text{ K}$ . При збільшенні тиску можуть утворюватися ромбічна ( $\delta$ ) модифікація [21, 22], а також високобарна тетрагональна структура (рис. 1).

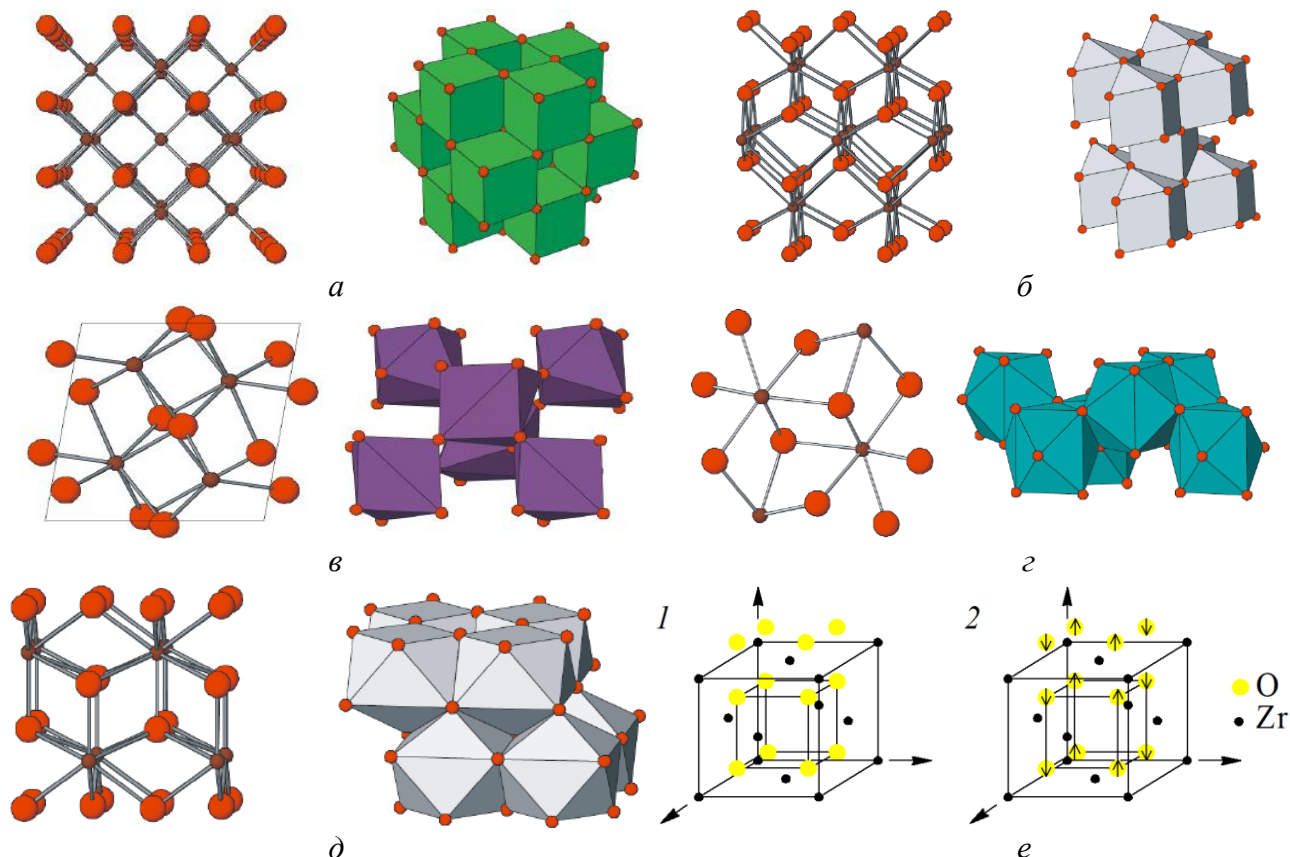


Рис. 1. Будава ґратів  $ZrO_2$  різної модифікації [23]:

$a$  – кубічні ( $c$ - $ZrO_2$ ),  $b$  – тетрагональні ( $t$ - $ZrO_2$ ),  $c$  – моноклінні ( $m$ - $ZrO_2$ ),  $d$  – орторомбічні ( $r$ - $ZrO_2$ ),  $e$  – високобарні тетрагональні,  $e$  – кубічні ґрати флюориту (1) та їхня перебудова при структурному перетворенні (2)

Дослідженню структурного стану  $ZrO_2$  [24, 25] та можливості його корегування [26, 27] приділяється значна увага. Не менше уваги приділено опису та уточненню рівноважної діаграми стану

$Zr-O$  [28, 29], діаграмам цього оксиду з іншими сполуками [30, 31], зокрема з тими, що є стабілізаторами кубічної кристалічної ґратки [32], та властивостям таких складних речовин (рис. 2) [33, 34].

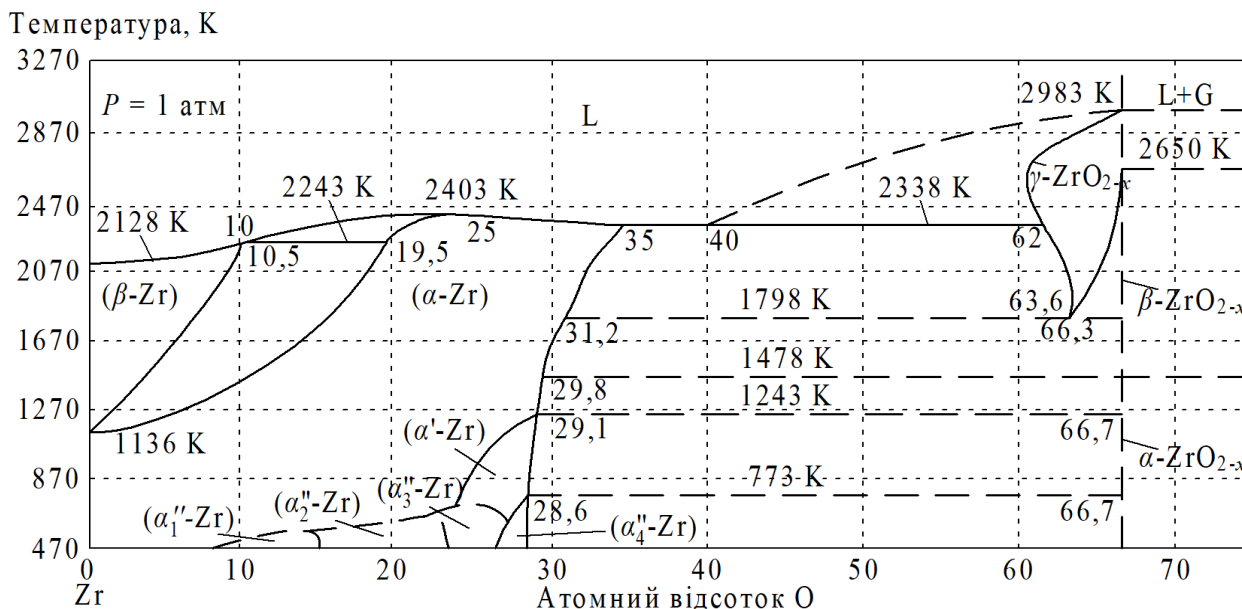


Рис. 2. Рівноважна діаграма стану системи  $Zr-O$  [29]

За даними [35], у системі цирконій–кисень можливе утворення таких фаз: тверді розчини кисню в  $\alpha-Zr$  та  $\beta-Zr$ ,  $Zr_6O$ ,  $Zr_3O$ ,  $Zr_2O$ ,  $ZrO$ ,  $Zr_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $ZrO_3$ ,  $ZrO_5$  і так званій розчин атомів цирконію в  $ZrO_2$ . Більшість з оксидних фаз є нестійкими, через це увагу дослідників присвячено частково сполуці  $ZrO$ , а здебільшого – діоксиду  $ZrO_2$ . Як вже зазначено,  $ZrO_2$  є поліморфною сполукою. Єдиної усталеної думки щодо кількості поліморфних форм, умов їхнього існування та температур переходів немає.

Відомо про існування вже перелічених форм – моноклінної (у природі існує як мінерал бадделіт), тетрагональної, кубічної, а також інших форм – метатетрагональної, низькотемпературної кубічної, тригональної, високотемпературної моноклінної, склоподібної.

Атомна будова моноклінної форми  $ZrO_2$  має досить високу міцність, про що

свідчить широка температурна область існування фази і рідкісна стійкість бадделіту в природних умовах. Для  $\alpha \leftrightarrow \beta$  перетворень  $ZrO_2$  є характерною наявність гістерезису, що пояснюється напруженнями в структурі внаслідок об'ємних змін, а також впливом домішок; режиму нагрівання, передісторією отримання проби [29, 36].

Перехід діоксиду цирконію з моноклінної модифікації до тетрагональної відбувається в досить широкому інтервалі температур та супроводжується об'ємними змінами від 7,7% до 9%, а також ендотермічним ефектом. Рентгенографічна (справжня) густина  $\alpha$ -фази становить  $5,56 \text{ г/см}^3$ ,  $\beta$ -фази –  $6,1 \text{ г/см}^3$  [37]. За даними різних авторів, початок переходу відбувається за температур  $800 \dots 1193 \text{ }^\circ\text{C}$ , а закінчується процес при  $1070 \dots 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Зворотний перехід (тетрагональної у моноклінну) починається при  $1035 \dots 920 \text{ }^\circ\text{C}$ , а завершується при  $850 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Зафіксовані розбіжності пов'язані з конкретною специфікою реалізації процесу фазового перетворення та характеристиками використаних у різних дослідженнях матеріалів, зокрема, на процес перетворення впливають ступінь очищення матеріалу, дисперсність, режим нагрівання та охолодження, методи дослідження зразків та використана апаратура [22, 29].

Тетрагональна фаза утворюється шляхом перебудови кисневої кубічної підґратки. В ході такої перебудови одна частина атомів кисню зміщується відносно іншої і у напрямку зсуву атомів кисню відбувається подовження елементарної комірки на величину близько 2 %.

Фазове перетворення в кристалах  $ZrO_2$  є перетворенням мартенситного типу та відбувається без дифузії шляхом колективного зміщення атомів на зразок зсуву без розриву зв'язків. Таке перетворення починається з границь зерен і просувається всередину зерна зі збільшенням тривалості старіння, а потім поширюється на навколишні зерна [38, 39].

Було доведено існування діоксиду цирконію в кубічній ( $\gamma$ ) формі при температурах  $2285 \pm 15$  °C. Кубічна форма належить до структурного типу флюориту  $CaF_2$ , гістерезис  $\beta \leftrightarrow \gamma$  перетворення діоксиду цирконію перебуває у межах  $20 \dots 30$  °C [40], а зміна об'єму при цьому становить близько 3 %. Точна температура  $\beta \rightarrow \gamma$  перетворення залежить від середовища, в якому відбувається процес [41]. Найповніший перехід зафіксовано при  $2350$  °C і високому парціальному тиску кисню, густина  $\gamma$ -форми  $ZrO_2$  при цьому дорівнює  $6,27$  г/см<sup>3</sup>.

За деякими даними, кубічна і тетрагональна модифікації діоксиду цирконію за певних умов можуть існувати в метастабільній формі в області температур  $300 \dots 500$  °C [42, 43]. Зафіксовано утворення проміжних форм у процесі термічного розкладання гідроксиду або солей цирконію. При нагріванні до  $450$  °C та вищих температур метастабільні

модифікації незворотно переходять у моноклінну модифікацію, яка у відповідній температурній області є стабільною. Аналогічний процес може відбуватись і при кімнатній температурі при тривалому зберіганні умов [37]. Утворення метастабільних форм діоксиду цирконію пов'язують з низкою факторів: стабілізацією аніонних вакансій [44], реалізацією правила східчастих переходів Оствальда [45], зміною поверхневої енергії [46], стабілізуючою дією домішок [47].

На поліморфні переходи структури  $ZrO_2$  визначальний вплив мають не тільки концентрація вакансій в катіонній та аніонній підґратках, але і співвідношення цих концентрацій [48, 49].

Для запобігання руйнуванню матеріалів на основі діоксиду цирконію внаслідок об'ємних змін при поліморфних перетвореннях застосовують так звану стабілізацію  $ZrO_2$  – переведення цих матеріалів у порівняно стабільні тверді розчини з різними оксидами.

Інокли стабілізують тетрагональну фазу  $ZrO_2$ . Загартовуванням необхідного ефекту досягти неможливо, кращий варіант – введення стабілізуючої домішки  $SiO_2$ .

Здебільшого стабілізують високотемпературну кубічну форму  $ZrO_2$ , яка при температурах, трохи нижчих за  $1000$  °C, переходить спочатку в тетрагональну, а потім в моноклінну модифікації. Основними вимогами до оксидів-стабілізаторів є близькість іонного радіуса катіона домішки до іонного радіуса цирконію, який для  $Zr^{4+}$  дорівнює  $0,87$  Å, а також наявність кубічних кристалічних ґратів [50]. Оптимальними стабілізаторами є дво- та тривалентні катіони, наприклад,  $Ca^{2+}$  (іонний радіус  $1,06$  Å),  $Mg^{2+}$  ( $0,78$ ),  $Y^{3+}$  ( $0,97$ ),  $Sc^{3+}$  ( $0,83$ ). Ще раз зазначимо, що головною вимогою до речовини-стабілізатора є можливість утворення твердого розчину з діоксидом цирконію. Саме ця вимога обмежує число надійних стабілізаторів фактично лише оксидами рідкісноземельних металів ( $Y_2O_3$ ,  $Yb_2O_3$ ,  $CeO_2$ ,  $HfO_2$ ), хоча стабілізуючі

властивості притаманні також оксидам лужноземельних металів, наприклад, MgO, CaO [51].

Відомо, що можливість існування найщільнішої упаковки сфер визначається критичним параметром, який дорівнює відношенню радіусів катіона та аніона. При значеннях, що менші за певний критичний рівень, існування тетрагональних та, відповідно, кубічних ґратів стає неможливим. Таким чином, при збільшенні радіуса катіона можна досягти стабілізації ґратів. Аналогічний ефект спостерігається також при утворенні додаткових вакансій в аніонній підґратці [52].

Структури типу флюориту у своєму складі містять метали здебільшого у вигляді

великих чотиривалентних катіонів. Оскільки іон  $Zr^{4+}$  є замалим для збереження структури флюориту при низьких температурах, для запобігання структурним змінам необхідно реалізувати часткове заміщення цих іонів катіонами більших розмірів, хоча такі катіони зазвичай мають нижчу валентність. Для збереження електронейтральності необхідно створити у структурі кисневі вакансії (рис. 3).

Оскільки в оксидах за високих температур зазвичай наявний надлишок кисневих вакансій, подальше збільшення їхньої концентрації при введенні відповідних добавок уповільнює дифузію, перешкоджає поліморфному переходу і стабілізує фазу [53].

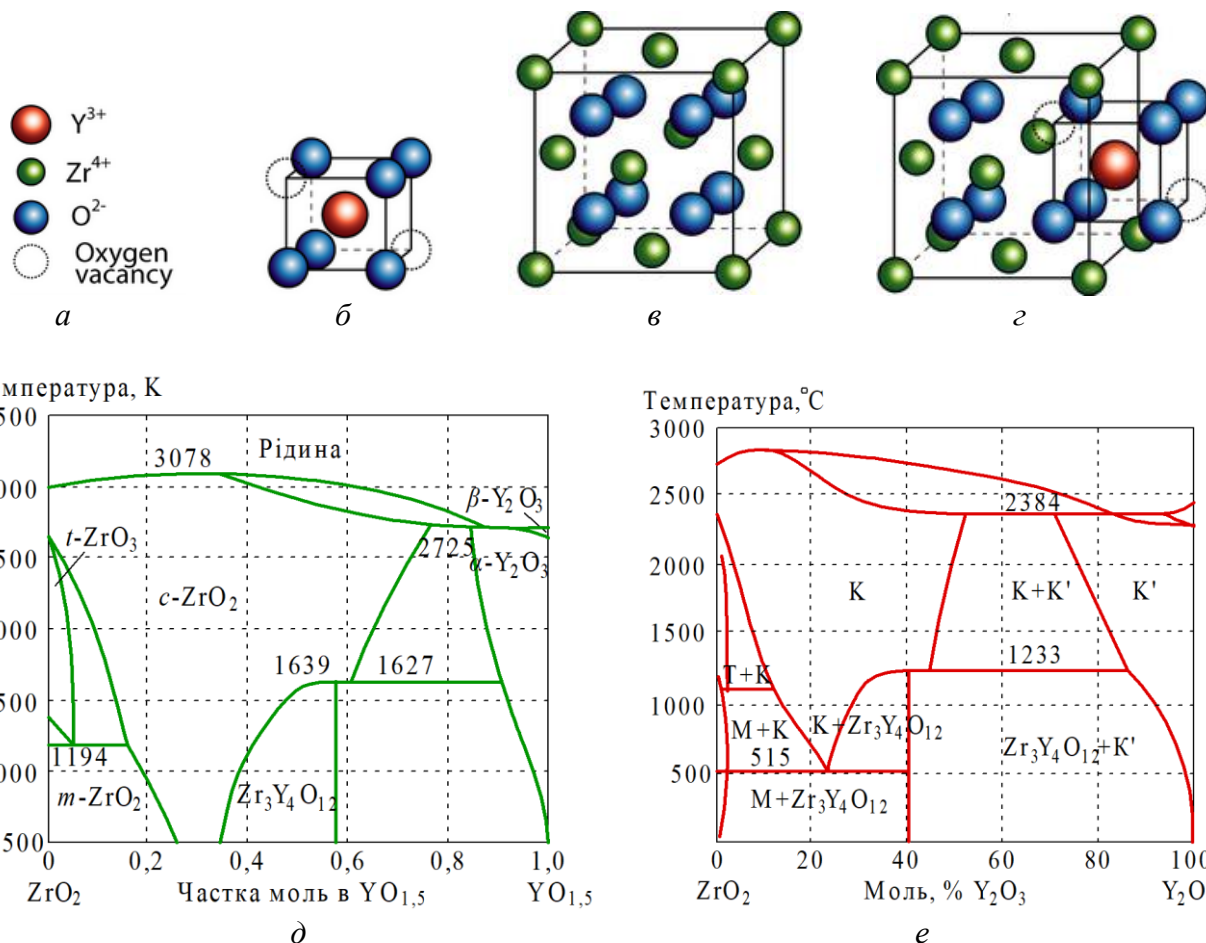


Рис. 3. Структурна перебудова при стабілізації  $ZrO_2$  оксидом ітрію та варіанти фазової діаграми  $ZrO_2 - Y_2O_3$  з різних джерел [54]: *a* – елементи структур; *б* –  $Y_2O_3$ ; *в* –  $ZrO_2$ ; *г* –  $ZrO_2+Y_2O_3$  (YSZ); *д* – [28]; *е* – [55]



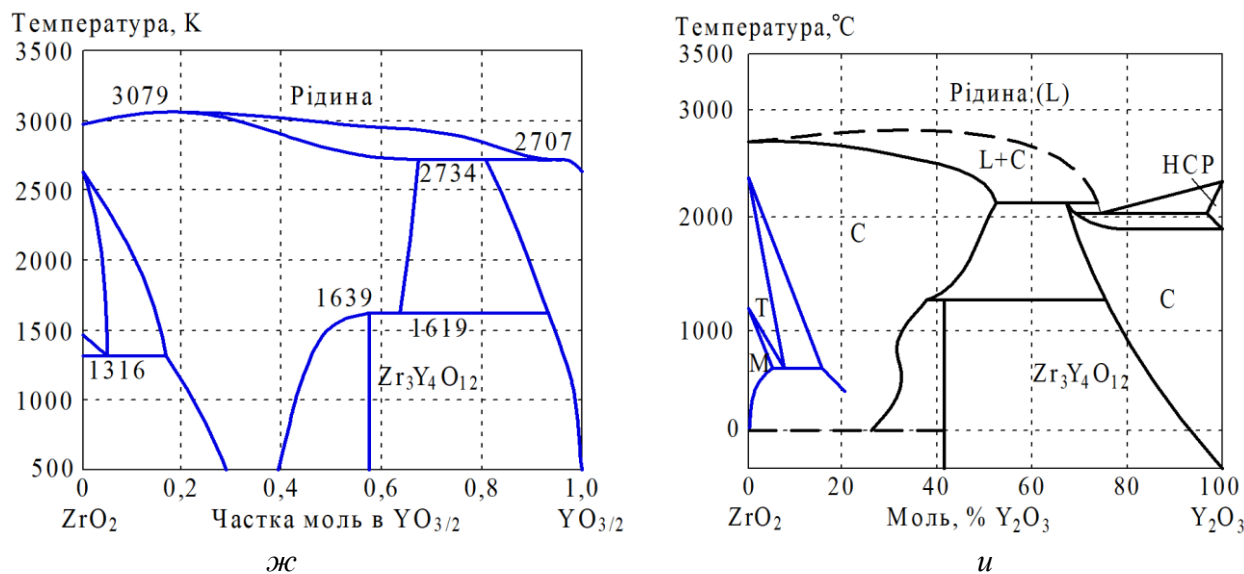


Рис. 3: ж – [56]; и – [57] (закінчення)

Важливою особливістю структури флюориту є можливість підтримувати високий ступінь заміщення, що сприяє іонній провідності. Додавання CaO (або MgO) у кількості 16 моль/% або  $Y_2O_3$  у кількості 8 моль/% достатньо для утворення повністю стабілізованого оксиду цирконію, структура якого стає кубічним твердим розчином без фазових перетворень при нагріванні від кімнатної температури до 2500 °С. Необхідно зазначити, що оксид ітрію за комплексом технічних, технологічних, економічних факторів вважається найоптимальнішим стабілізатором для діоксиду цирконію. В даній роботі також застосовували цей оксид.

Побудові та вивченню фазової діаграми  $ZrO_2$ – $Y_2O_3$  присвячено багато уваги, відомо більше 30 варіантів цієї діаграми, при цьому результати різних авторів мають суттєві розбіжності (рис. 3), отримані різними авторами експериментальні результати є дуже суперечливими, окремі частини діаграми не можна остаточно вважати надійними. Розрахунки, що виконані за аналізом приблизно однакових масивів експериментальних даних, показали порівняно близькі результати для

температур, що перевищують 1000 °С, хоча температури низки фазових перетворень різняться на декілька десятків чи навіть сотень градусів, а області існування різних фаз – більше ніж на 10 %.

Необхідно зауважити, що гранулометричні показники порошків вихідних оксидів, зокрема, порошку стабілізатора, суттєво впливають на діаграму стану  $Y_2O_3$ – $ZrO_2$ . За розрахунками, додавання наночастинок оксиду ітрію змінює температури фазових перетворень [58]. Визначено, що зі зростанням температури діапазони  $c$ – $ZrO_2$  та  $t$ – $ZrO_2$  розширюються, а область  $m$ – $ZrO_2$  зменшується.

Труднощі експериментальних досліджень структурно-фазових перетворень у системі  $Y_2O_3$ – $ZrO_2$  обумовлені, поперше, складністю рентгенівських досліджень при температурах, що перевищують 1800 °С. Більшість результатів було отримано при кімнатних температурах на зразках, що максимально швидко охолоджувались від передплавильних температур. Зрозуміло, що неможливо виключити можливість зміни структурно-фазового стану зразків при охолодженні навіть з максимальними швидкостями. По-друге, при порівняно низьких температурах (менших за 1200 °С) дифузія катіонів

настільки уповільнюється, що дуже важко досягти рівноважного стану. По-третє, невизначеність температурних границь мартенситного перетворення ускладнює інтерпретацію мікроструктури зразків. Крім того, треба враховувати вплив методів приготування зразків, гранулометрії, чистоти вихідних матеріалів, термічної обробки та інших технологічних факторів.

За температур, що перевищують температури існування області моноклінної фази, на діаграмі є двофазна область спільного існування моноклінної та тетрагональної форм, за якою наявна область тетрагональної фази, схильної до трансформування. Цей тетрагональний твердий розчин існує в області складів від 0 до 6 мол. % оксиду ітрію та при охолодженні трансформується в моноклінну форму. При більших концентраціях оксиду ітрію існує двофазна область тетрагональної та кубічної фаз. Подальше збільшення концентрації оксиду ітрію призводить до утворення однофазного кубічного твердого розчину.

Кількісний показник вмісту стабілізатора в матеріалі багато в чому має визначальний вплив на властивості кераміки, при цьому надлишок стабілізатора дуже негативно впливає на структурну стабільність діоксиду цирконію, що обумовлено такими причинами:

- нерівномірністю розподілу стабілізатора по перетину вихідних порошків, що зберігається і в кінцевому матеріалі;

- сумісним виділенням як багатої стабілізатором фази  $Zr_3Y_4O_{12}$ , так і тетрагональної фази складу  $ZrO_2 - 8,3 \% Y_2O_3$ ;

- перетворенням в моноклінну фазу зерен складу  $ZrO_2 - 1,6 \% Y_2O_3$ ;

- впливом розміру зерен фазових включень, особливо дрібнокристалічних.

Додатковий термічний вплив на матеріал лише підсилює сегрегацію стабілізатора та сприяє ще більшій фазовій неоднорідності матеріалу. Зазначимо, що подолання перелічених ускладнень є завданням оптимізації технологічного процесу формування керамічних порошків для подальшого використання [59].

При додаванні недостатньої кількості стабілізатора виходить частково стабілізований оксид цирконію, що є сумішшю кубічної та метастабільної тетрагональної фаз  $ZrO_2$ . З фазової діаграми виходить, що при концентраціях стабілізуючого оксиду менше 8 моль/% можливе існування тетрагонального твердого розчину діоксиду цирконію. Оскільки верхня температурна межа фазової стабільності цих твердих розчинів є температурою фазового переходу  $t-ZrO_2 \rightarrow c-ZrO_2$  і ця температура нижча за температуру плавлення, то саме такі матеріали і назвали частково стабілізованим діоксидом цирконію [60].

Найсуттєвішим недоліком стабілізації діоксиду цирконію додаванням оксиду ітрію є схильність цього композитного матеріалу до деградації в температурному інтервалі від 25 до 400 °C, яка можлива за наявності пари води та за своєю сутністю є повільною трансформацією структури у моноклінну форму. На кінетику такої трансформації впливають різні технологічні фактори (тиск пари, склад газового середовища, розмір зерна, інші домішки) [61]. Причиною зазначених структурних змін може бути проникнення молекул води на місця кисневих вакансій, що суттєво погіршує дифузію іонів та загальну стабільність матеріалу.

Можливі варіанти синтезу оксидних сполук зі структурою пірохлору було розглянуто в попередньому дослідженні авторів [62]. При виконанні даної роботи для синтезу оксидних сполук зі структурою пірохлору було використано метод змішування промислових оксидів цирконію та ітрію. Хоча методи хімічного осадження суміші цих оксидів є багато в чому привабливішими (в першу чергу внаслідок підвищеної чистоти та однорідності кінцевих продуктів), методику простого змішування обирали з урахуванням набутого досвіду та зроблених висновків при попередніх спробах використання різних вихідних сполук ітрію, а саме:

- при прожарюванні нітрату ітрію та осадженого гідроксиду ітрію при 800 °C в

повітряній атмосфері було одержано лише суміш нітридів та оксидів ітрію, синтезу складних сполук не відбувалося, тобто мети роботи досягнуто не було;

– використання хлоридів ітрію є неможливим, оскільки ці сполуки при нагріванні не розкладаються, а переходять у газовий летючий стан у молекулярній формі;

– використання сульфатів ітрію при терморозкладанні приводить до формування оксидів, хоча кінцевий продукт містить велику кількість шкідливих домішок сульфідів.

Результати попередніх досліджень [62] при використанні технологій вакуумного спікання та гарячого вакуумного

пресування були недостатньо задовільними або практично негативними, через що від зазначених технологій відмовились.

Спікання та синтез сполук здійснювали за температур 1200 °С, 1400 °С та 1500 °С у повітряному середовищі. Тривалість високотемпературної витримки варіювали від 2 до 20 год.

Мікроструктуру та склад зразків визначали з використанням електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу. На рис. 4, *a* наведено мікроструктуру зразка, що був спечений при температурі 1500 °С з тривалістю витримки 5 год, а на рис. 4, *б* – розподіл елементів по поверхні зламу цього зразка.

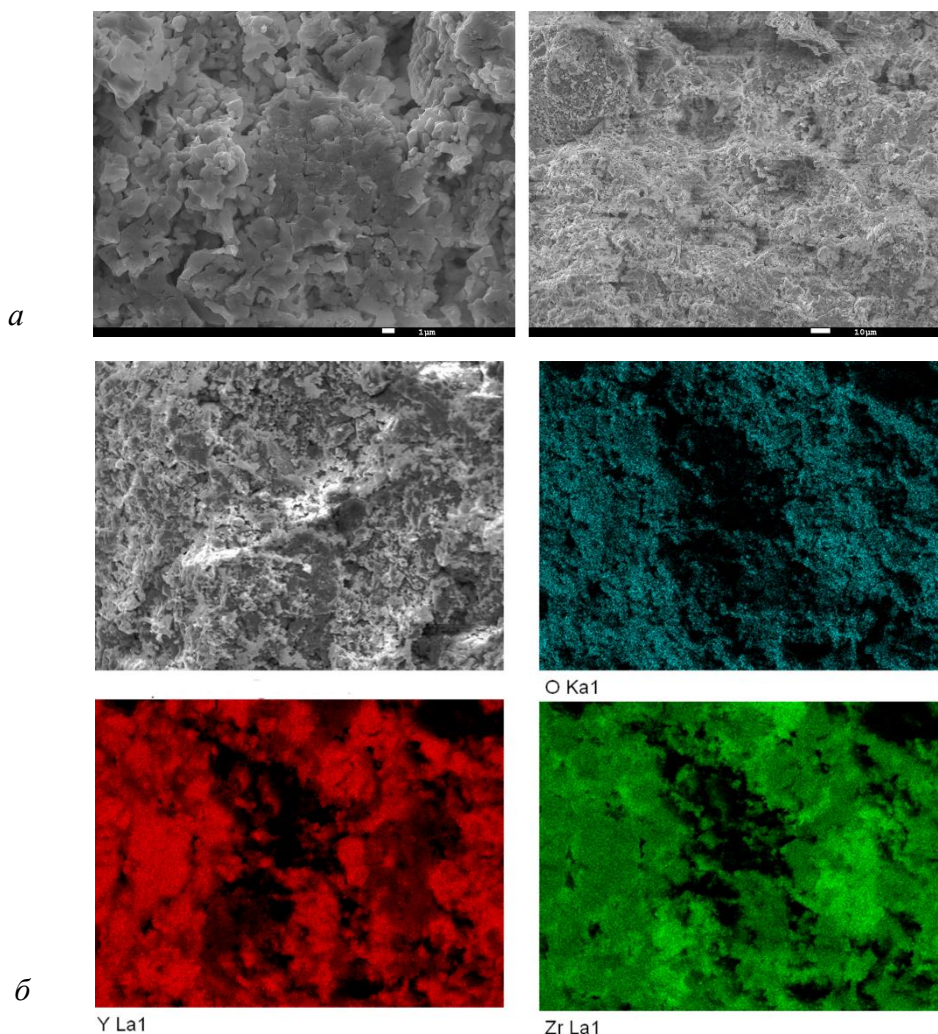


Рис. 4. Мікроструктура зразка  $Y_2O_3-2ZrO_2$ , спеченого при 1500 °С з витримкою 5 год (JSM-700IF) (*a*), розподіл елементів по поверхні зламу зразка (*б*)

Аналіз мікроструктури зразка свідчить, що він утворений кристалітами з розмірами від 100 нм до 1000 нм. Між кристалітами наявна велика кількість пор з аналогічними розмірами. Також у зразку є значна кількість тріщин і окремих великих пор розміром до 10 мкм. Значна кількість пор свідчить про активну дифузію елементів під час спікання та реалізацію реакцій синтезу сполук зі зміною параметрів ґратів та питомого об'єму ґратів утворених сполук. Це може бути причиною, що суттєво ускладнює отримання за зазначених технологічних умов кераміки з великою густиною та щільністю.

Аналіз розподілу елементів на поверхні зламу (рис. 4, б) свідчить про належну рівномірність на більшій частині поверхні за виключенням декількох областей (Y та Zr).

Запресовані при тиску 100 МПа та спечені при 1200 °С впродовж 20 год зразки суміші оксидів ітрію та цирконію мали середню відносну густину 3,25 г/см<sup>3</sup>, що становить близько 58 % від теоретичної густини дослідженої суміші оксидів.

Фазовий склад досліджених зразків наведено у таблиці.

Таблиця

Фазовий склад окремих зразків, сформованих за різних температур та тривалостей витримки

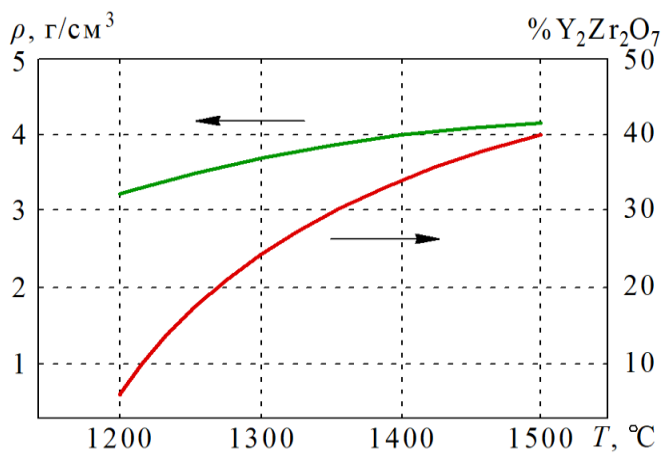
№	Температура та тривалість спікання	Фази	Вагова частка, %	Параметри ґратів, Å
1	1200 °С, 20 год	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	48,9	10,602
		Y <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	18,3	10,407
		ZrO <sub>2</sub> -c	16,1	5,150
		ZrO <sub>2</sub> -t	16,7	a = 3,607; c = 5,175
2	1400 °С, 2 год	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47,8	10,596
		Y <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	30,6	10,424
		ZrO <sub>2</sub> -c	15,9	5,149
		ZrO <sub>2</sub> -t	5,7	a = 3,602; c = 5,173
3	1400 °С, 5 год	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43,1	10,601
		Y <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	33	10,448
		ZrO <sub>2</sub> -c	16,5	5,150
		ZrO <sub>2</sub> -t	7,4	a = 3,606; c = 5,173
4	1500 °С, 2 год	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42,5	10,601
		Y <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	36,7	10,459
		ZrO <sub>2</sub> -c	16	5,151
		ZrO <sub>2</sub> -t	4,8	a = 3,607; c = 5,182
5	1500 °С, 5 год	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,1	10,596
		Y <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	40,9	10,459
		ZrO <sub>2</sub> -c	21,4	5,151
		ZrO <sub>2</sub> -t	6,6	a = 3,604; c = 5,183

Аналіз даних таблиці свідчить про можливість керувати процесом синтезу пірохлору зміною технологічних параметрів високотемпературного спікання. Зокрема, за рентгенівськими даними, в отриманих зразках кількість пірохлорної фази Y<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>

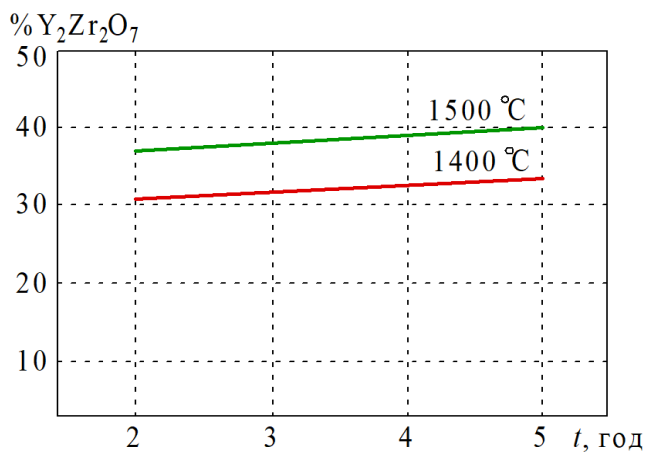
становила від 18 % до майже 41 % (за вагою), при цьому вплив температури є помітно суттєвішим за тривалість високотемпературної витримки (рис. 5, а). Зауважимо, що температура спікання також впливає на густину зразків, хоча цей вплив є

не таким суттєвим, як її вплив на швидкість реакцій синтезу пірохлору, що визначає вміст цієї фази. Вплив температурно-

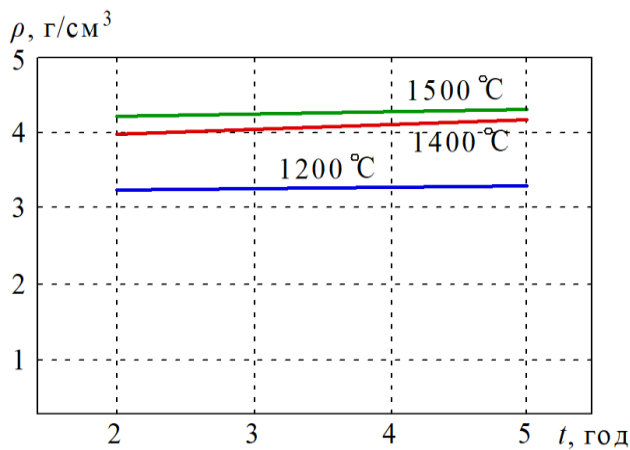
часових параметрів спікання на швидкість синтезу пірохлорної фази наведено на рис. 5, б, а на густину зразків – рис. 5, в.



а



б



в

Рис. 5. Залежність густини спечених зразків та частки пірохлору  $Y_2Zr_2O_7$  від температури спікання:

а – при тривалості високотемпературної витримки 5 год; б – при спіканні за температур 1400 °C та 1500 °C; в – при спіканні за температур 1200 °C, 1400 °C та 1500 °C

Отримані експериментальні дані про швидкість процесів синтезу пірохлору свідчать про принципову можливість реалізації цього процесу за зазначених технологічних умов, однак технологія отримання пірохлору  $Y_2Zr_2O_7$  шляхом випалу суміші оксидів при максимально апробованій температурі спікання  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  не є економічно виправданою, для повної реакції та частки пірохлорної фази більше 90 % потрібний багатогодинний високотемпературний вплив, що, за попередніми оцінками та деякими літературними даними, становитиме декілька сотень годин.

При виконанні роботи було апробовано варіант описаної технології, за яким спікання здійснювали за декілька стадій, при цьому після кожної стадії спікання зразки кераміки знову подрібнювали і пресували, після чого продовжували спікання. Суттєвого ефекту зростання пірохлорної фази не було зафіксовано, а втрати матеріалу при подрібненні у планетарному млині були помітними. Через зазначені причини такий варіант було визнано неприйнятним.

**Висновки.** Для отримання зразків з більшим вмістом пірохлору необхідно:

– значно підвищити температуру синтезу суміші оксидів до плавлення, що може бути реалізовано електронно-променевим методом, або нагріванням у плазмі; доведено можливість здійснення реакції синтезу фази  $Y_2Zr_2O_7$  зі структурою пірохлору при високотемпературному спіканні у повітрі суміші оксидів ітрію та цирконію;

– якщо синтез при плавленні не буде ефективним, треба буде залучити технологію переривання спікання з подрібненням спеку; швидкість реакції синтезу фази  $Y_2Zr_2O_7$  залежить від температурно-часових параметрів спікання, при цьому вплив температури є визначальним;

– синтез пірохлору  $Y_2Zr_2O_7$  можливо реалізувати термічним розкладанням нітратів ітрію при  $800\text{ }^\circ\text{C}$  в атмосфері кисню (без азоту); застосовані температури (до  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ ) є недостатніми для необхідної інтенсифікації синтезу фази  $Y_2Zr_2O_7$  та його повного завершення.

### Список використаних джерел

1. Borman V. D., Kargin N. I. Conference of Physics of Nonequilibrium Atomic Systems and Composites. 2015 and Conference of Heterostructures for Microwave, Power and Optoelectronics: Physics, Technology and Devices. *Physics Procedia, Physics Procedia*. 2015. Vol. 72. 552 p.
2. Lee J.-S. Moving from convergence to divergence: the future of nanotechnology. *Nanotechnology Reviews*. 2014. Vol. 3, No. 5. P. 411–412.
3. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. Prospects for the development of power electronics by application of technologies for production of power semiconductor switches based on silicon carbide. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, No. 4. P. 170–173.
4. Gevorkyan E. S., Nerubatskyi V. P., Gutsalenko Yu. H., Morozova O. M. Some features of ceramic foam filters energy efficient technologies development. *Modern engineering and innovative technologies*. 2020. Issue 14. Part 1. P. 46–60. DOI: 10.30890/2567-5273.2020-14-01-014.
5. Bai X.-M. Efficient Annealing of Radiation Damage Near Grain Boundaries via Interstitial Emission. *Science Mag*. 2010. Vol. 327. P. 1631–1634.
6. Allen G. B., Kerr M. Measurement and modeling of strain fields in zirconium hydrides precipitated at a stress concentration. *J. Nucl. Mater*. 2012. Vol. 430. P. 27–36.
7. Gevorkyan E. S., Rucki M., Kagramanyan A. A., Nerubatskiy V. P. Composite material for instrumental applications based on micro powder  $Al_2O_3$  with additives nano-powder SiC. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019. Vol. 82. P. 336–339. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.05.010.

8. Arzhavitin V. M. Study of the influence of alloying with nanostructured  $ZrO_2$  oxides on the properties of steel X18H10T. *VANT*. 2013. Vol. 5 (87). P. 58–65.
9. Skuratov V. A., Sohatsky A. S., O'Connell J. H. Swift heavy ion tracks in  $Y_2Ti_2O_7$  nanoparticles in EP450 ODS steel. *J. Nucl. Mater.* 2015. Vol. 456. P. 111–114.
10. Геворкян Е. С., Нерубацький В. П. Моделювання процесу гарячого пресування  $Al_2O_3$  при прямому пропусканні змінного електричного струму з частотою 50 Гц. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 110. С. 45–52.
11. Melnikov P., Nascimento V. A., Consolo L. Z., Silva A. F. Mechanism of thermal decomposition of yttrium nitrate hexahydrate,  $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$  and modeling of intermediate oxynitrates. *J. of Therm. Analysis and Calorimetry*. 2013. Vol. 111, No. 1. P. 115–119.
12. Мікроструктура аустенітної сталі 08X18H10T, механічно легованої наноксидами системи  $Y_2O_3-ZrO_2$  / С. В. Старостенко, В. М. Воеводін, М. А. Тихоновський, М. І. Даніленко, О. С. Кальченко, О. М. Великодний, Н. Ф. Андрієвська. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2015. Вип. 51. № 6. С. 70–74.
13. Beresnev V. M., Toryanik I. N., Pogrebnyak A. D., Sobol O. V., Kolesnikov D. A., Lytovchenko S. V., Turbin P. V. Structure and physical and mechanical properties of nanocomposite (Zr–Ti–Cr–Nb)N and (Ti–Zr–Al–Nb–Y)N coatings, obtained by vacuum–arc evaporation method. *Nanocomposites, Nanophotonics, Nanobiotechnology and Applications. Springer Proceedings in Physics*. 2014. Vol. 5. P. 75–84.
14. Litovchenko S. High-temperature silicides: properties and application. *East Eur. J. Phys.* 2016. Vol. 3, No. 3. P. 4–24.
15. Gevorkyan E., Nerubatskyi V., Gutsalenko Yu., Melnik O., Voloshyna L. Examination of patterns in obtaining porous structures from submicron aluminum oxide powder and its mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6 (108). P. 41–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216733.
16. Інтегровані технології обробки матеріалів: підручник / Е. С. Геворкян, Л. А. Тимофєєва, В. П. Нерубацький, О. М. Мельник. Харків: УкрДУЗТ, 2016. 238 с.
17. Azarenkov N. A., Litovchenko S. V., Beresnev V. M., Chishkala V. A., Veliev Yu. I. Condensation of silicide films from pure components. *VANT. Series: Vacuum, pure materials, superconductors*. 2014. Vol. 1 (89). P. 180–183.
18. Arkhipova N. A. Zirconium: state and development prospects of the world market. *GIREDMET: «Economics and Management»*. 2002. Vol. 5. P. 66–70.
19. Нові матеріали та технології їх отримання: підручник / Е. С. Геворкян, Г. Д. Семченко, Л. А. Тимофєєва, В. П. Нерубацький. Харків: Діса плюс, 2015. 344 с.
20. Ruff O., Ebert F. Zum der Keramischen Hoch fenerfest Stoffe. *Zeitschrift fur Anorganische und Allgemeine Chemic*. 1929. Vol. 180, No. 1. P. 19–41.
21. Inamura E. Ya. Refractories and their application: Per. from japan. *Metallurgy*. 1984. 72 p.
22. Block S., Yornada J. A., Piermarini G. J. Pressure – Temperature Phase Diagram of Zirconia. *J. Amer. Cer. Soc.* 1985. Vol. 68, No. 9. P. 497–490.
23. Okovityi V. V. Choice of oxides for stabilizing zirconium dioxide in the preparation of heat-protective coatings. *Science and Technology*. 2015. Vol. 5. P. 26–32.
24. Геворкян Э. С., Нерубацький В. П., Мельник О. М. Горячее прессование нанопорошков состава  $ZrO_2-5\%Y_2O_3$ . *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2010. Вип. 119. С. 106–110.
25. Virkar A. V., Clarke D. R. The tetragonal-Monoclinic Transformation in Zirconia: Lessons learned and future trends. *J. Am. Ceram. Soc.* 2009. Vol. 92, No. 9. P. 1901–1920.
26. Нові керамічні композиційні матеріали інструментального призначення: монографія / Р. В. Вовк, Е. С. Геворкян, В. П. Нерубацький, М. М. Прокопів, В. О. Чишкала, О. М. Мельник. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2018. 200 с.

27. Hannink R. H., Kelly P. M., Muddle B. C. Transformation Toughening in Zirconia: Containing Ceramics. *J. Amer. Ceram. Soc.* 2004. Vol. 83, No. 3. P. 461–487.
28. Chen M., Hallstedt B., Gauckler L. Thermodynamic modeling of the  $ZrO_2$ – $YO_{1.5}$  system. *Solid State Ionics*. 2014. Vol. 170. P. 255–274.
29. Ondic H. M., McMurdie H. F. Phase Diagrams for Zirconium and Zirconia Systems. *Hardcover*. 1998. 525 p.
30. Banerjee S., Mukhopadhyay P. Phase Transformation: Examples from Titanium and Zirconium Alloys, *Pergamon Press*. 2007. P. 6–11.
31. Alisin V. V., Borik M. A., Kulebyakin A. V. Investigation of the mechanical properties of crystals of partially stabilized zirconium dioxide by the method of kinetic microindentation. *Inorganic materials*. 2015. Vol. 6 (51). P. 609–613.
32. Christel P., Meunier A., Heller M., Torre J., Peille C. Mechanical properties and short-term in-vivo evaluation of yttrium-oxide-partially-stabilized zirconia. *J. Biomed. Mater. Res.* 1989. Vol. 23. P. 45–61.
33. Borik M. A., Volkova T. V., Kulebyakin A. V., Lomonova E. Ye., Kulebyakin A. V., Milovich F. O., Myzina V. A., Ryabochkina P. A., Tabachkova N. Yu., Chabushkin A. N. Phase composition and spectral-luminescent properties of crystals of zirconia partially stabilized with yttrium, doped with  $Nd_2O_3$  and  $CeO_2$ . *Springer Verlag, Optics and Spectroscopy*. 2015. Vol. 6 (118). P. 949–955.
34. Borik M. A., Bublik V. T., Vilkova M. Yu. Structure, phase composition and mechanical properties of  $ZrO_2$  crystals partially stabilized by  $Y_2O_3$ . *Materials of electronic technology*. 2014. Vol. 1 (65). P. 58–64.
35. Toropov N. A., Barzakovsky V. P., Bondar I. A., Udalov Yu. P. State diagrams of silicate systems. Directory. Second edition. Metal – oxygen compounds of silicate systems. *Ed. «Science»*. 1970. Vol. 2. 372 p.
36. Voronko Yu. K., Ignatov B. V., Lomonova E. E. Investigation of high-temperature phase transitions in solid solutions based on  $ZrO_2$  and  $HfO_2$  by the method of Raman light scattering. *Solid State Physics*. 1980. Vol. 22, No. 4. P. 1034–1038.
37. Rutman D. S., Toropov Yu. S., Pliner S. Yu. Highly refractory materials from zirconium dioxide. *Metallurgy*. 1985. 136 p.
38. Harushige T., Yoshihide K., Masahito N. Surface relief associated with yttria ceramics observed by atomic force microscopy. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1999. Vol. 82, No. 10. P. 2921–2923.
39. Behrens G., Dransmann G. W., Heuer A. H. On the isothermal martensitic transformation in 3Y – TZP. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1993. Vol. 76, No. 4. P. 1025–1030.
40. Rauh E. G., Garg S. P. The  $ZrO_{2-x}$  (cubic) –  $ZrO_{2-x}$  (cubic + tetragonal) Phase Boundary. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1980. Vol. 63. P. 239–240.
41. Collonques R., Revcolevsci A., Foex M. Phase transformation of zirconium dioxide. *Collog. Ine CNRS*. 1972. Vol. 205. P. 241–246.
42. Tae M. Y., Kyu P. H., Kyung K. D., Hee K. C. Preparation of monodisperse and spherical zirconia powders by heating of alcohol – aqueous salt solutions. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1995. Vol. 78, No. 10. P. 2690–2694.
43. Srinivasan R., Rice L., Davis B. Critical particle size and phase transformation in zirconia: transmission electron microscopy and X-ray diffraction studies. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1990. Vol. 73, No. 11. P. 3528–3530.
44. Sukharevsky B. Ya., Alapin B. G., Gavrish A. M. On the peculiarities of the kinetics of the polymorphic transformation of zirconium dioxide upon cooling. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1964. Vol. 156, No. 3. P. 677–680.
45. Meyer K. Physico-chemical crystallography: Per. with him. *Metallurgy*. 1972. 480 p.



46. Polezhaev Yu. M. Low-temperature cubic and tetragonal forms of zirconium dioxide. *ZhFKh*. 1967. Vol. 41, No. 11. P. 2958–2959.
47. Glushkova V. B. Rare earth metals, alloys and compounds. *Science*. 1973. P. 206–217.
48. Gavrish A. M., Sukharevsky B. Ya., Krivoruchko P. P. Influence of heating rate on temperature characteristics of diffusionless transformation of zirconium dioxide. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1967. Vol. 4. P. 886–889.
49. Belyakov A. V. Stabilization of polymorphic phases in oxides. Polymorphic transformations. *Glass and ceramics*. 1999. Vol. 2. P. 16–17.
50. Sukharevsky B. Ya., Gavrish A. M., Alapin B. G. Polymorphic transformations of zirconium dioxide. *Coll. scientific. tr. UNIIO*. 1968. Vol. 9. P. 5–28.
51. Virkar A. V., Clarke D. R. The tetragonal-Monoclinic Transformation in Zirconia: Lessons learned and future trends. *J. Am. Ceram. Soc.* 2009. Vol. 92, No. 9. P. 1901–1920.
52. Krogstad J. A., Lepple M., Gao Y., Lipkin D. M., Levi G. G. Effect of Yttria Content on the Zirconia Unit Cell Parameters. *J. Am. Ceram. Soc.* 2011. Vol. 94. P. 4548–4554.
53. Gevorkyan E. S., Nerubatskyi V. P., Chyshkala V. O., Morozova O. M. Cutting composite material based on nanopowders of aluminum oxide and tungsten monocarbide. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. Iss. 15. Part 2. P. 6–14. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-15-02-020.
54. Sikarwar S., Yadav B. C., Singh S., Dzhardimalieva G. I., Pomogailo S. I., Golubeva N. D., Pomogailo A. D. Fabrication of nanostructured yttria stabilized zirconia multilayered films and their optical humidity sensing capabilities based on transmission. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. Vol. 232. P. 283–291.
55. Degtyarev S. A., Voronin G. F. Solution of ill-posed problems of thermodynamics of phase equilibria. *Journal. physical chemistry*. 1987. 611 p.
56. Fabrichnaya O., Aldinger F. Assessment of the Thermodynamic Parameters in the System  $ZrO_2$ – $Y_2O_3$ – $Al_2O_3$ . *Zeitschrift fur Metallkunde*. 2004. Vol. 95 (1). P. 27–39.
57. Wang L., Zhong X. H., Zhao Y. X., Tao S. Y., Zhang W., Wang Y., Sun X. G. Design and optimization of coating structure for the thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying via finite element method. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2014. Vol. 2. P. 102–116.
58. Asadikiya M., Sabarou H., Chen M., Zhong Y. Phase Diagram for Nano Yttria–Stabilized Zirconia System. *RSC Advances*. 2016. Vol. 6, No. 21. P. 17438–17445.
59. Геворкян Е. С., Нерубацький В. П. До питання отримання тонкодисперсних структур з нанопорошків оксиду алюмінію. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 111. С. 151–167.
60. Hannink R. H., Kelly P. M., Muddle B. C. Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics. *J. Amer. Ceram. Soc.* 2004. Vol. 83, No. 3. P. 461–487.
61. Gevorkyan E. S., Morozova O. M., Sofronov D. S., Nerubatskyi V. P., Ponomarenko N. S. The formation of  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ -nanoparticles from fluoride solutions. Abstracts of the II International Advanced Study Conference on Condensed Matter and Low Temperature Physics 2021 «*CM&LTP 2021*» (6–12 June 2021, Kharkiv). Kharkiv: FOP Brovin O. V., 2021. P. 190.
62. Синтез та структурні характеристики оксидів системи  $Y_2O_3$ – $Zr_2O_3$ – $TiO_2$ : звіт про НДР (остаточ.): 40–16 / Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна; кер. М. Азаренков; викон. С. Литовченко та ін. Харків, 2016. 32 с.

---

Чишкала Володимир Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тел.: +38 (097) 242-05-56. E-mail: vchishkala@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8634-4212.

Литовченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тел.: +38 (050) 694-33-21. E-mail: s.lytovchenko@karazin.ua. ORCID iD: 0000-0002-3292-5468.

---

Геворкян Едвин Спартаківич, доктор технічних наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 596-32-16.  
E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.  
Тел.: +38 (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Мазілін Богдан Олександрович, аспірант кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тел.: +38 (099) 714-89-05.  
E-mail: mazilin@karazin.ua. ORCID iD: 0000-0003-1576-0590.

Морозова Оксана Миколаївна, аспірантка кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (097) 170-62-95.  
E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Chyshkala Volodymyr Oleksiyovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Reactor Construction Materials and Physical Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University. Tel.: +38 (097) 242-05-56.  
E-mail: vchishkala@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8634-4212.

Lytovchenko Serhii Volodymyrovych, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Reactor Construction Materials and Physical Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University. Tel.: +38 (050) 694-33-21.  
E-mail: s.lytovchenko@karazin.ua. ORCID iD: 0000-0002-3292-5468.

Gevorkyan Edwin Spartakovych, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com.  
ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-76.  
E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Mazilin Bogdan Olexandrovych, postgraduate student, Department of Reactor Construction Materials and Physical Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University. Tel.: +38 (099) 714-89-05. E-mail: mazilin@karazin.ua.  
ORCID iD: 0000-0003-1576-0590.

Morozova Oksana Mykolaivna, Postgraduate, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (097) 170-62-95. E-mail: oksanabakan2012@gmail.com.  
ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Статтю прийнято 16.09.2021 р.

---

---

**ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)**

---

---

УДК 621.315

**АНАЛІЗ ТОЧНИХ І АПРОКСИМУЮЧИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ АКТИВНОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКА ВІД ЧАСТОТИ СТРУМУ ПІД ДІЄЮ СКІН-ЕФЕКТУ**

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій,  
аспіранти Д. А. Гордієнко, Г. А. Хоружевський, М. В. Філіп'єва

**ANALYSIS OF EXACT AND APPROXIMATING DEPENDENCES OF ACTIVE RESISTANCE OF A CONDUCTOR ON THE CURRENT FREQUENCY BASED ON THE INFLUENCE OF SKIN EFFECT**

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, postgraduate student D. A. Hordiienko,  
postgraduate student H. A. Khoruzhevskyi, postgraduate student M. V. Philipjeva

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248216>

***Анотація.** Залізничні системи електропостачання постійного і змінного струму містять досить широкий гармонічний склад струмів, який зумовлено роботою імпульсних напівпровідникових перетворювачів електричного рухомого складу та тягових підстанцій. На базі рівнянь Бесселя визначено аналітичні вирази, що описують залежність активного та повного опору електричної мережі від частоти струму і зумовлюються дією скін-ефекту. На їх основі отримано вирази для розрахунку додаткових втрат потужності під дією вищих гармонік струмів. Проведено аналіз збіжності отриманих рівнянь з даними міжнародного стандарту МЕК 60287-1-1. Для зони високих частот наведено спрощені апроксимуючі залежності, що визначають параболічну залежність активного опору від частоти. Для інженерних розрахунків отримано спрощені апроксимуючі залежності активного опору від частоти вищих гармонік. Отримані рівняння можуть бути використані при визначенні додаткових втрат потужності в активних опорах електричних мереж, обмотках електричних машин, високочастотних трансформаторах від вищих гармонік струмів при різних нелінійних навантаженнях. Крім того, отримані вирази можуть бути використані при обтунтуванні використання фільтрокомпенсуючих пристроїв.*

***Ключові слова:** скін-ефект, рівняння Максвелла, функції Бесселя, гармоніки струму, додаткові втрати потужності.*

***Abstract.** The operation of semiconductor power converters, which are part of traction substations, frequency-controlled electric drives and other powerful nonlinear loads, cause a significant emission of higher harmonics of currents to electrical networks. Higher harmonics of currents in electrical networks cause a complex negative effect on the energy efficiency of the network. The increase in power losses in the active resistance under the action of higher harmonics is due to the increase in the root mean square value of the current and the action of the skin effect.*

*Analytical expressions describing the dependence of the active and impedance of the electric network on the current frequency are determined. Based on them, analytical expressions are obtained for the calculation of additional power losses under the action of higher harmonics of currents, which are due to the skin effect. The dependences of the active resistance of the electric network on the frequency of higher harmonics are determined on the basis of Bessel equations. The analysis of*

convergence of the received equations with the data of the international standard IEC 60287-1-1 is carried out. For the high-frequency zone, simplified approximating dependences are given, which determine the parabolic dependence of the active resistance on the frequency. Simplified approximating dependences of active resistance on the frequency of higher harmonics are obtained for engineering calculations. The obtained equations can be used to determine additional power losses in the active supports of electrical networks, windings of electric machines, high-frequency transformers from higher harmonics of currents at different nonlinear loads. In addition, the obtained expressions can be used to justify the use of filter-compensating devices.

**Keywords:** skin effect, Maxwell's equation, Bessel functions, current harmonics, additional power losses.

**Вступ.** Робота тягових підстанцій постійного струму та електричного рухомого складу з асинхронним електроприводом зумовлена дією напівпровідникових перетворювачів електроенергії, які викликають значну емісію вищих гармонік струмів до електричних мереж [1, 2]. Вищі гармоніки струмів в електричних мережах викликають комплексну негативну дію на енергоефективність мережі [3, 4]. Підвищення втрат потужності в активному опорі під дією вищих гармонік відбувається з причини збільшення середньоквадратичного значення струму та під дією скін-ефекту [5, 6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У публікаціях [7, 8] показано, що додаткові втрати потужності в активному опорі провідників ліній електропередач, які зумовлені скін-ефектом від протікання струмів вищих гармонік, визначаються за виразом

$$P_{harm} = m \cdot \sum_{v=2}^{v=n} I_v^2 \cdot R_{dc} \cdot k_{se}, \quad (1)$$

де  $m$  – кількість фаз;  $v$  – номер гармоніки;  $n$  – кількість розглянутих гармонік;  $k_{se}$  – коефіцієнт, що враховує ефект збільшення опору провідника під дією скін-ефекту;  $I_v$  – середньоквадратичне значення  $v$ -ї гармоніки;  $R_{dc}$  – активний опір провідника постійному струму.

Різними авторами виконано дослідження змін коефіцієнта  $k_{se}$ , який визначає збільшення активного опору

провідника у функції частоти струму. Так, в роботах [9, 10] визначення величини коефіцієнта  $k_{se1}$  у функції порядку гармоніки струму описано рівнянням

$$k_{se1} = 0,47 \cdot \sqrt{v}, \quad (2)$$

де  $v$  – порядковий номер вищої гармоніки, для якої розраховується коефіцієнт.

У роботах [11, 12] наведено рівняння, що описує залежність питомого опору провідника від частоти струму, яке враховує дію скін-ефекту та ефекту близькості:

$$r_{0v} = r_0 \cdot (k_{se2} + k_{sv}), \quad (3)$$

де  $k_{sv}$  – коефіцієнт, що визначає вплив ефекту близькості для  $i$ -ї гармоніки;  $r_0$  – питомий опір провідника.

Згідно з [13, 14] коефіцієнт  $k_{se2}$  для мідних провідників визначається за виразом (4), а для алюмінієвих провідників – за виразом (5):

$$k_{se2} = 0,021 \cdot \sqrt{f}; \quad (4)$$

$$k_{se2} = 0,01635 \cdot \sqrt{f}, \quad (5)$$

де  $f$  – частота струму.

У роботі [15] шляхом експериментальних досліджень отримано значення коефіцієнта  $k_{se3}$  для різних типів провідників. Дані коефіцієнти наведено в таблиці.

Таблиця 1

Апроксимовані залежності коефіцієнта  $k_{se3}$  для різних типів проводів

Тип провідника	$k_{se3}$
АС-400	0,3v
А-400	0,15v
Мідний кабель	0,06v
Алюмінієвий кабель	0,06v

На рис. 1 наведено залежності, які відображають збільшення опору провідника змінному струму  $R_{ac}$  на частоті  $f$  відносно опору провідника постійному струму  $R_{dc}$ , які

розраховано за допомогою вищенаведених коефіцієнтів  $k_{se1}$ ,  $k_{se2}$  і  $k_{se3}$  для мідних проводів.

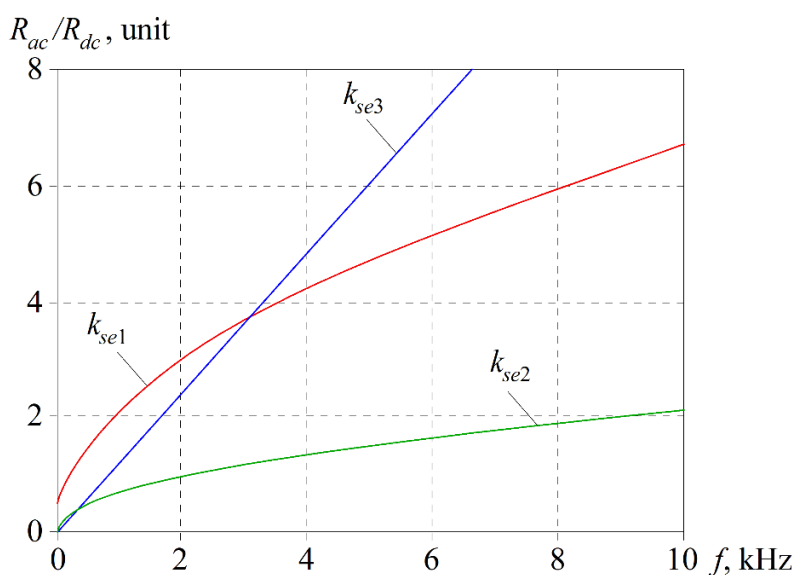


Рис. 1. Залежності збільшення опору провідника відносно частоти  $f$

Як випливає з рис. 1, існуючі залежності, що описують залежність опору електричних провідників від частоти струму, є досить різними і взаємовиключними. Крім цього, згідно із залежностями (2)...(5) та залежностями, що наведено на рис. 1, в діапазоні низьких частот коефіцієнти  $k_{se1}$ ,  $k_{se2}$  і  $k_{se3}$  набувають значень менше одиниці. Це фактично свідчить про те, що, згідно з цими виразами, зниження електричного опору у даному діапазоні частот є нижче значення опору постійному струму, тобто «надпровідності» провідника на низьких частотах струму, що суперечить фізичним законам. Таким чином, існуючі вирази, що

описують збільшення електричного опору провідників під дією скін-ефекту, є взаємовиключними і неточними. Це пояснюється тим, що існуючі вирази не враховують геометричні властивості провідників, а саме діаметр провідника, який досить сильно впливає на інтенсивність дії скін-ефекту.

У роботі [16] подано аналітичні вирази, що описують відносне значення розподілу щільності струму в циліндричному провіднику за його перетином. Проте вказані вирази не дають можливості визначити абсолютні значення розподілу щільності струму в провіднику, абсолютні

значення збільшення активного опору провідника та збільшення втрат потужності в провіднику при протіканні високочастотного струму під дією скін-ефекту.

Таким чином, з проведеного огляду можна зробити висновок, що існуючі вирази, які описують збільшення електричного опору провідників під дією скін-ефекту, є взаємовиключними і неточними, що пояснюється тим, що вони не враховують геометричні властивості провідників, а саме діаметр провідника, який досить сильно впливає на інтенсивність дії скін-ефекту.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є визначення залежності активного опору електричної мережі під дією скін-ефекту від частоти вищих гармонік струму. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– подання аналітичних залежностей активного опору провідника від частоти за допомогою функцій Бесселя-Кельмана;

– визначення співвідношення отриманих рівнянь з існуючими апроксимуючими залежностями та даними міжнародного стандарту МЕК 60287-1-1 «Кабелі електричні. Розрахунок номінального струмового навантаження»;

– визначення апроксимуючих залежностей, що визначають залежність величини активного опору від частоти для діапазону високих частот.

**Основна частина дослідження.**

Аналітичну залежність активного опору провідника від частоти, внаслідок дії скін-ефекту, отримуємо шляхом запису першого рівняння Максвелла в циліндричній системі координат [17, 18]. Для цього розглянемо проходження гармонічного струму по прямолінійному циліндричному провіднику і визначимо електромагнітне поле всередині проводу [19, 20], сумістивши його вісь із віссю  $z$  циліндричної системи координат (рис. 2).

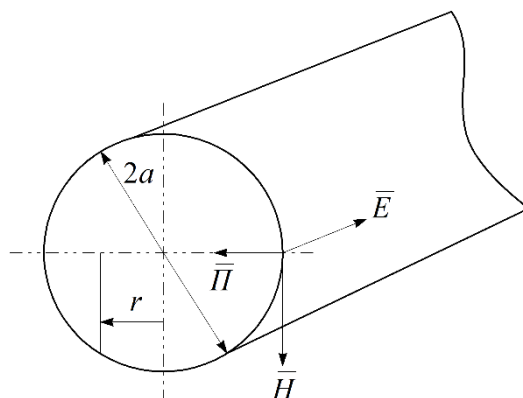


Рис. 2. Прямолінійний циліндричний провідник

На рис. 2 наведено такі позначення:  $\vec{P}$  – вектор щільності потоку енергії електромагнітного поля (вектор Пойнтінга);  $\vec{H}$  – вектор напруженості магнітного поля;  $\vec{E}$  – вектор напруженості електричного поля;  $r$  – поточний радіус.

У силу того, що на провід не діють поля інших провідників, щільність струму розподілена симетрично навколо осі проводу і відсутній ефект близькості:

$$\left( \text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \right), \quad (6)$$

де  $\vec{J}$  – вектор щільності електричного струму;  $\vec{D}$  – вектор електричного зміщення;  $d\vec{D}/dt$  – щільність струму зміщення.

Так як щільність струму зміщення  $d\vec{D}/dt$  набагато порядків менше щільності струму  $J$ , то в (6) величиною  $d\vec{D}/dt$  можна

знехтувати. В цьому випадку система основних рівнянь, яка описує електромагнітні процеси, набуває вигляду:

$$\begin{cases} \operatorname{rot}\bar{H} = \bar{J}; \\ \operatorname{rot}\bar{E} = -\mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{d\bar{H}}{dt}; \\ \operatorname{div}\bar{E} = 0; \\ \operatorname{div}\bar{H} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Для спрощення розв'язку виключимо з цієї системи векторів поля  $\bar{E}$ . Для того щоб виключити вектор  $\bar{E}$ , достатньо обчислити  $\operatorname{rot}$  правої і лівої частини першого рівняння системи (7):

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot}(\bar{H})) = \operatorname{rot}(\bar{J}) = \operatorname{rot}(\sigma \bar{E}) = \sigma \cdot \operatorname{rot}(\bar{E}) \quad (8)$$

Підставивши у праву частину отриманого виразу (8) з другого рівняння системи (7) значення  $\operatorname{rot}\bar{E}$ , отримаємо вираз

$$\left( \operatorname{rot}(\operatorname{rot}\bar{H}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div}\bar{H}) - \nabla^2 \bar{H} \right). \quad (9)$$

Після перетворень, маючи на увазі, що  $\operatorname{div}\bar{H} = 0$ , отримаємо

$$\nabla^2 \bar{H} - \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0 \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = 0. \quad (10)$$

Виключаючи вектор  $\bar{H}$ , отримаємо абсолютно аналогічне рівняння для вектора  $\bar{E}$

$$\nabla^2 \bar{E} - \sigma \cdot \mu \cdot \mu_0 \frac{d\bar{E}}{dt} = 0, \quad (11)$$

де  $\nabla$  – оператор Набла;  $\sigma$  – провідність струмоведучої частини.

Для тривимірного евклідового простору в прямокутній декартовій системі координат оператор Набла визначається виразом [21, 22]

$$\nabla = \frac{d}{dx} \vec{i} + \frac{d}{dy} \vec{j} + \frac{d}{dz} \vec{k}, \quad (12)$$

де  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  – одиничні просторові вектори по осях  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

З огляду на це, вираз (11) в циліндричній системі координат набуває вигляду

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot \left( r \frac{d\bar{E}}{dr} \right) - j\omega \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot \bar{E} = 0. \quad (13)$$

Виконавши диференціювання і зробивши заміну змінних, отримаємо

$$\eta = r \sqrt{j\omega \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \sigma} = r \sqrt{-\gamma^2} = jr \cdot \gamma; \quad (14)$$

$$\frac{d^2 \bar{E}}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \cdot \frac{d\bar{E}}{d\eta} + \bar{E} = 0. \quad (15)$$

Рівняння (11) являє собою рівняння Бесселя при  $n = 0$ .

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{dy}{dx} + \left( 1 + \frac{n^2}{x^2} \right) \cdot y = 0. \quad (16)$$

Розв'язання для  $\bar{H}$  одержимо з другого рівняння Максвелла:

$$\bar{H} = -\frac{1}{j\omega \cdot \mu \cdot \mu_0} \cdot \operatorname{rot}(\bar{E}) = \left[ \frac{1}{j\omega \cdot \mu \cdot \mu_0} \cdot \frac{dE_z}{dr} \right] \cdot \vec{e}_\alpha. \quad (17)$$

Вектор напруженості електричного поля  $\vec{E}$  обчислюємо за формулою

$$\bar{E} = \frac{\bar{J}}{\sigma} = \frac{q \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sigma} \cdot \frac{J_0 \cdot (q \cdot r)}{J_1 \cdot (q \cdot a)}, \quad (18)$$

де  $J_0$  – функція Бесселя першого роду нульового порядку;  $J_1$  – функція Бесселя першого роду першого порядку;  $r$  – поточний радіус проводу,  $a$  – максимальний радіус проводу;  $\sigma$  – питома провідність провідника, см/м;  $q$  – хвильове число проводу.

Хвильове число проводу  $q$  є комплексною змінною і визначається виходячи зі значення товщини скін-шару  $\Delta$

$$q = \frac{1}{\Delta} - i \cdot \frac{1}{\Delta}. \quad (19)$$

Товщина скін-шару  $\Delta$  визначається згідно з виразом

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \cdot \mu \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}}, \quad (20)$$

де  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність матеріалу ( $\mu/\mu_0$  – безрозмірна величина), для міді 0,999992; для алюмінію 1,000022;  $\mu$  – абсолютна магнітна проникність,  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ ;  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму,  $1,25663706 \cdot 10^{-6}$  Н/А;  $f$  – частота змінного струму, Гц;  $\gamma$  – питома електрична провідність,  $\gamma = 1/\rho$ ;  $\rho$  – питомий опір провідника ( $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ), для алюмінію –  $2,7 \cdot 10^{-8}$ ; для міді –  $1,72 \cdot 10^{-8}$ .

Із урахуванням (19) і (18) розподіл комплексної щільності струму в провіднику заданого радіусу буде визначатись так:

$$\bar{J}(r) = \frac{q \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \frac{J_0 \cdot (q \cdot r)}{J_1 \cdot (q \cdot a)}. \quad (21)$$

Напруженість магнітного поля визначається за виразом

$$\bar{H} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \frac{J_0 \cdot (q \cdot r)}{J_1 \cdot (q \cdot a)}. \quad (22)$$

Потужність, що розсіюється циліндричним провідником  $P$ , визначається законом Джоуля-Ленца у векторній формі

$$P = \bar{J} \cdot \bar{E} = \gamma \cdot E^2; \quad (23)$$

$$dP = [I^2 \cdot R] dt, \quad (24)$$

де  $\bar{J}$  – вектор щільності електричного струму;  $\bar{E}$  – напруженість електричного поля;  $\gamma$  – провідність провідника;  $R$  – опір провідника;  $I$  – струм, що проходить через провідник.

У той же час потужність розсіювання можна знайти, використовуючи теорему Умова-Пойнтінга, яка описує закон збереження енергії електромагнітного поля:

$$\frac{du}{dt} + \nabla \cdot \bar{P} = -\bar{J} \cdot \bar{E}, \quad (25)$$

де  $u$  – щільність енергії;  $\nabla$  – оператор Набла;  $\bar{P}$  – вектор Пойнтінга;  $J$  – щільність струму;  $E$  – напруженість електричного поля.

$$u = \frac{1}{2} (\epsilon_0 \cdot E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}), \quad (26)$$

де  $\epsilon_0$  – електрична стала;  $\mu_0$  – магнітна стала.

Вектор Пойнтінга  $\bar{P}$ , який визначає щільність енергії електромагнітного поля, компоненти якого входять до складу енергій-імпульсу електромагнітного поля, визначається як векторний добуток двох векторів

$$\bar{P} = [\bar{E} \times \bar{H}], \quad (27)$$

де  $E$ ,  $H$  – вектори напруженості електричного і магнітного полів відповідно.



Потужність розсіювання, виходячи з теореми Умова-Пойнтінга, яка описує закон збереження енергії в електромагнітному полі, може бути визначена так:

$$P = \oint_S [\overline{E} \cdot \overline{H}] \cdot dS. \quad (28)$$

З (28) одержуємо комплексний опір провідника

$$Z = \frac{\oint_S [\overline{E} \cdot \overline{H}] dS}{I^2} = \frac{q l}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sigma} \cdot \frac{J_0(q \cdot r)}{J_1(q \cdot a)} \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \frac{J_1(q \cdot r)}{J_1(q \cdot a)} \cdot 2 \pi a \cdot l = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \gamma} \cdot \frac{J_0(q \cdot r_0)}{J_1(q \cdot r_0)} \cdot l, \quad (30)$$

$$Z = R + i \cdot X = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \gamma} \cdot \frac{J_0(q \cdot r)}{J_1(q \cdot r)} \cdot l, \quad (31)$$

де  $X$  – реактивний опір провідника;  $R$  – активний опір провідника;  $i$  – комплексна складова;  $q$  – хвильове число проводу;  $r$  – радіус проводу;  $l$  – довжина проводу;  $J_0(Z)$  – функція Бесселя першого роду нульового порядку;  $J_1(Z)$  – функція Бесселя першого роду першого порядку.

З огляду на те, що площа бічної поверхні циліндричного провідника дорівнює  $S$ , а радіус поверхні дорівнює радіусу проводу  $r = a$ , із (28), отримуємо вираз, який визначає опір провідника:

Активний опір проводу  $R$  визначається дійсною частиною комплексного опору  $Z$  з виразу (31).

Отримані залежності активного опору мідного проводу довжиною 10 км з різними діаметрами (1 – 0,5 мм; 2 – 1 мм; 3 – 2 мм; 4 – 4 мм) від частоти розрахованих відповідно до виразу рівняння (9) наведено на рис. 3.

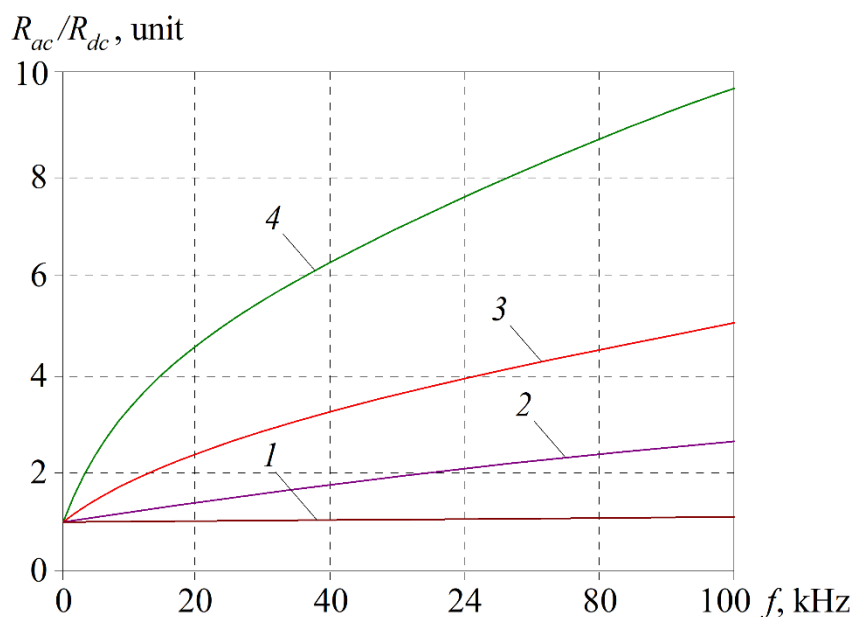


Рис. 3. Залежності активного опору мідного проводу з різними діаметрами від частоти

З рис. 3 витікає висновок про те, що частота струму та діаметр проводу в значній мірі впливають на інтенсивність скін-ефекту.

Для підтвердження отриманого аналітичного виразу розподілу щільності струму в перетині циліндричного моножилного проводу (21) при протіканні

середньоквадратичного значення струму 1 А шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання із застосуванням програми «Ansys Electronics – Maxwell 3D» було виконано дослідження розподілу щільності струму в мідному провіднику діаметром 8 мм при протіканні струму із частотами 50 Гц (рис. 4, а) та 10 кГц (рис. 4, б).

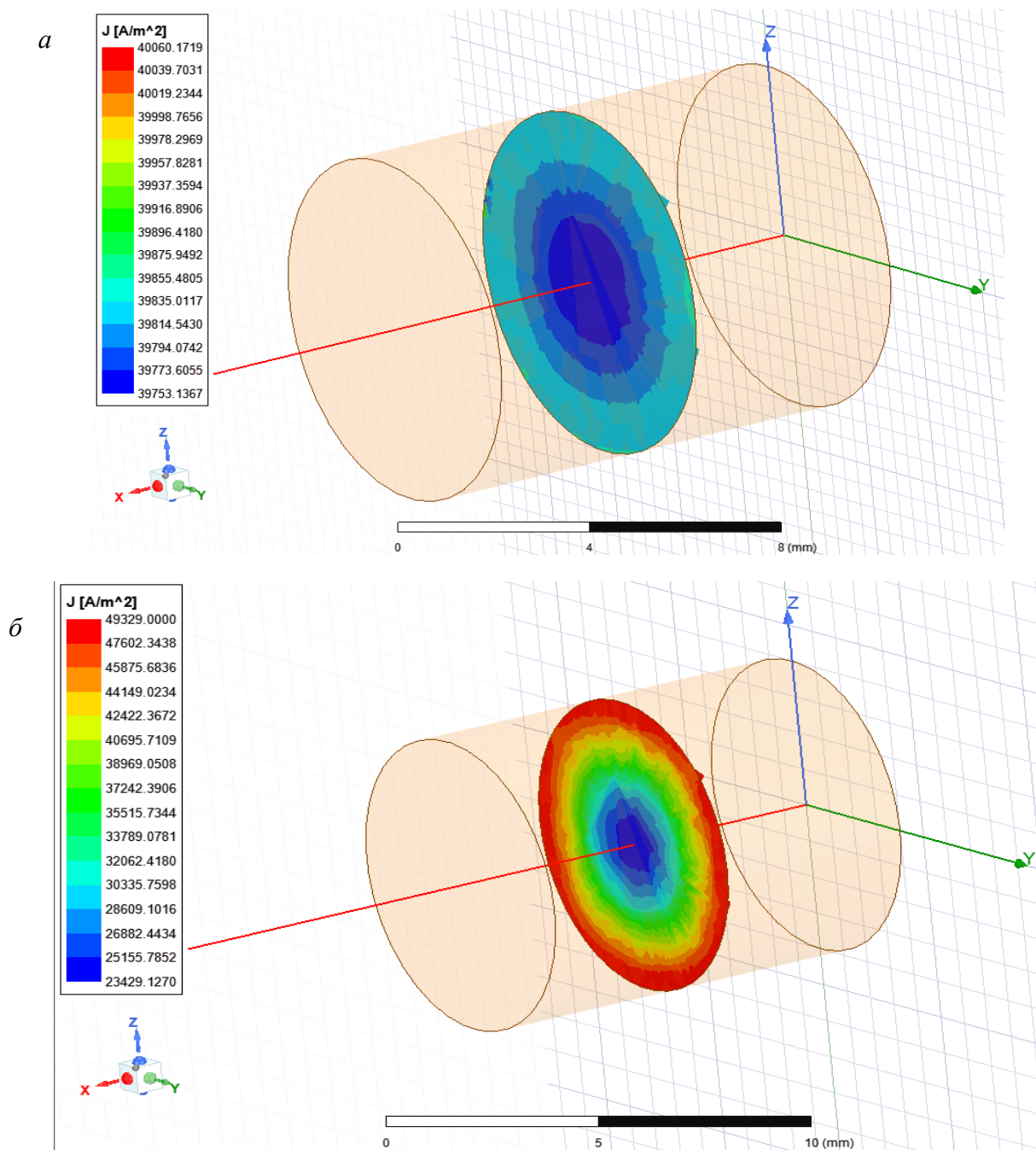


Рис. 4. Розподілення щільності струму в мідному провіднику діаметром 8 мм при протіканні струму із частотами: а – 50 Гц; б – 10 кГц

Як видно із результатів моделювання впливу скін-ефекту, збільшення частоти струму досить суттєво впливає на розподіл щільності струму  $i$ , як результат, на значення еквівалентного опору провідника.

Спрощений розрахунок додаткових втрат потужності від дії поверхневого ефекту може бути виконано шляхом застосування спрощених емпіричних залежностей, які подано в міжнародному стандарті МЕК 60287-1-1-2009 «Кабелі електричні. Розрахунок номінального струмового навантаження». В цьому стандарті подано емпіричні залежності, що визначають зростання активного опору кабелів від частоти струму. Згідно з п. 2.1 цього стандарту, опір жили змінному струму  $R$ , Ом/м, на одиницю довжини в усіх випадках, за винятком кабелів, прокладених в трубопроводах, визначається за виразом

$$R = R' (1 + y_s + y_p), \quad (32)$$

де  $R'$  – опір жили постійного струму при максимальній робочій температурі, Ом/м;  $y_s$  – коефіцієнт поверхневого ефекту;  $y_p$  – коефіцієнт ефекту близькості.

На даному етапі досліджень проведено аналіз дії виключно поверхневого ефекту. Вплив ефекту близькості буде досліджено в подальшій публікації, тому коефіцієнт близькості в розрахунку не враховувався.

Опір жили постійного струму на одиницю довжини з урахуванням діаметра провідника визначається так:

$$R' = \frac{\rho}{\pi \cdot r^2}, \quad (33)$$

де  $\rho$  – питомий опір провідника;  $r$  – радіус провідника.

Коефіцієнт поверхневого ефекту, згідно із стандартом МЕК 60287-1-1-2009, визначається згідно з виразом

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4}, \quad (34)$$

де  $x_s$  – аргумент Бесселя, який визначається так:

$$x_s = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R' \cdot 10^7}} \cdot k_s. \quad (35)$$

Коефіцієнт  $k_s$  для одножильних, багатожильних і сегментних проводів набуває значення 1 (згідно з табл. 1 з МЕК 60287-1-1-2009).

Важливо, що в п. 2.1.2 стандарту МЕК 60287-1-1-2009 вказується, що формули (34), (35) є точними лише в певному діапазоні досліджуваних частот, в якому аргумент Бесселя  $x_s$  не перевищує значення 2,8.

Виходячи з того, що аргумент Бесселя  $x_s$  залежить від частоти і радіуса проводу, і для коректності розрахунку він не має перевищувати значення 2,8, можна визначити критичне значення частоти  $F_{crit}$ , що обмежує застосування формул (7)–(9). Дана залежність визначається за виразом

$$F_{crit} = \frac{\rho \cdot 10^7 \cdot 2,8^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot r^2}. \quad (36)$$

Графічно залежність критичної частоти  $F_{crit}$  від радіуса провідника наведено на рис. 5.

У зв'язку з тим, що спектр вищих гармонік струмів в електричних мережах регламентується до частоти 2 кГц, а напівпровідникові перетворювачі генерують ще більший широкосмуговий спектр вищих гармонік спожитих струмів, то застосування формул (7), (8), (9) досить обмежене.

Проведемо аналіз збіжності результатів розрахунків опору мережі відповідно до повного аналітичного виразу залежності повного опору від частоти на базі рівнянь Бесселя (31) та емпіричних рівнянь, наведених у МЕК 60287-1-1, виразів (34), (35). На одних координатних площинах побудуємо залежності активного опору провідників для жил з радіусом 10 мм, 5 мм і 2 мм, вирішені відповідно до

рівнянь Бесселя і МЕК 60287-1-1. Отримані залежності наведено на рис. 6 (1 – характеристика, відповідно до рівнянь Бесселя, 2 – апроксимуюча залежність, відповідно до МЕК). На рис. 6, а наведено залежності відносного активного опору

проводу радіусом 10 мм від частоти. На рис. 6, б наведено залежності відносного активного опору проводу радіусом 5 мм від частоти. На рис. 6, в наведено залежності відносного активного опору проводу радіусом 2 мм від частоти.

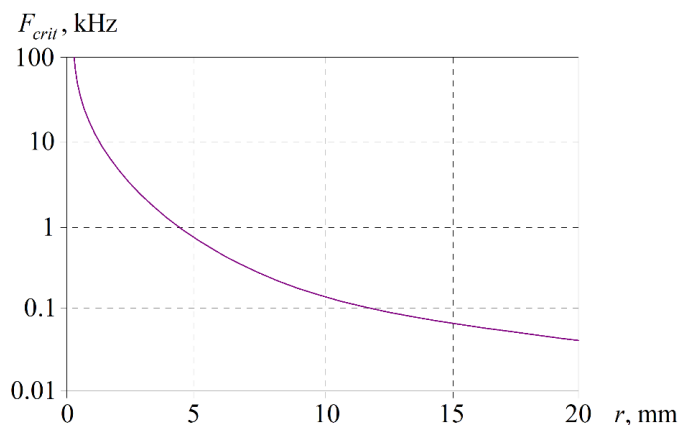


Рис. 5. Розподілення щільності залежності критичної частоти  $F_{crit}$  від радіуса провідника

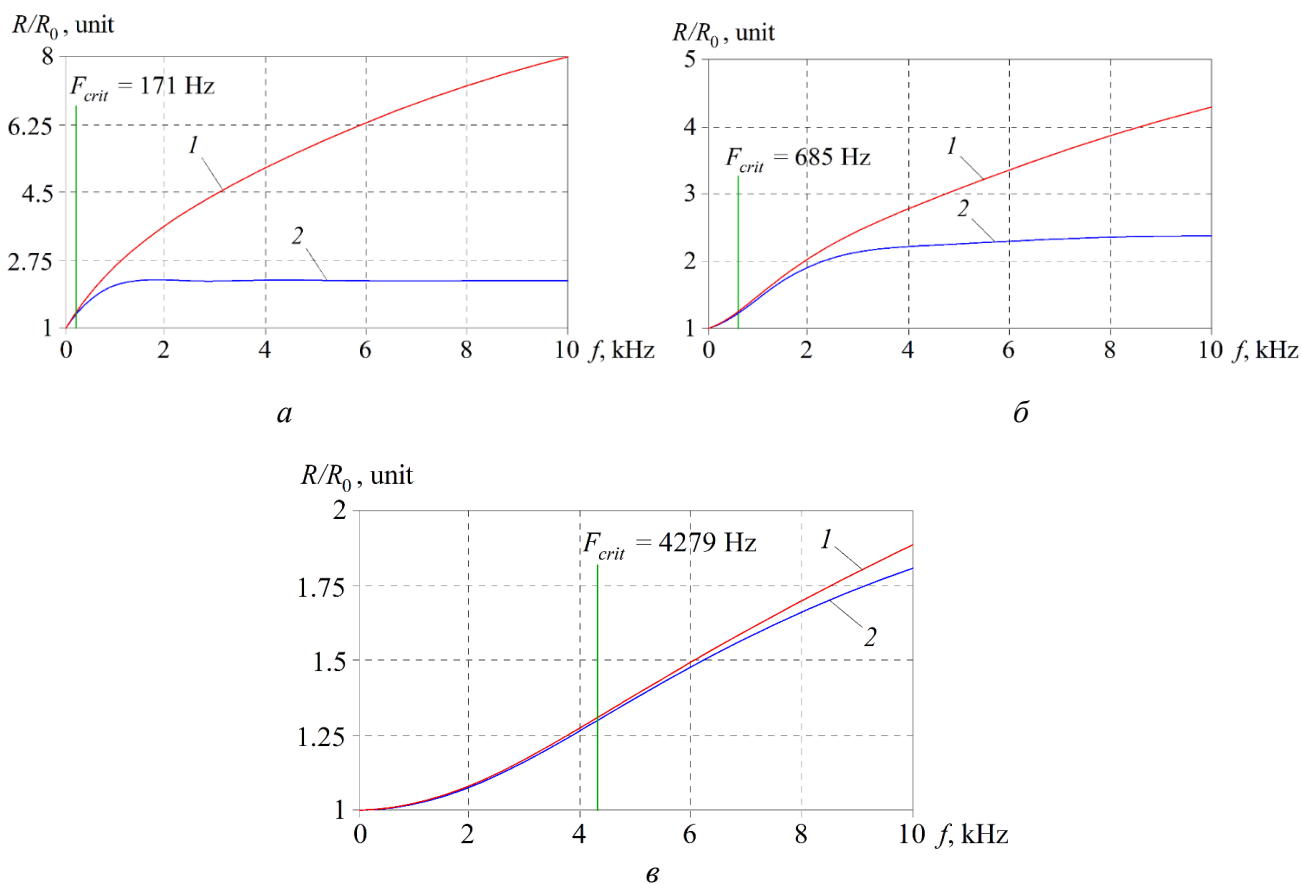


Рис. 6. Залежності відносного активного опору проводу з радіусом від частоти:  
 а –  $r = 10$  мм; б –  $r = 5$  мм; в –  $r = 2$  мм

З отриманих залежностей видно, що збіжність апроксимуючої залежності в стандарті МЕК 60287-1-1-2009 з результатами розв'язання за допомогою функцій Бесселя фактично говорить про можливість застосування апроксимуючої функції МЕК до частоти при значенні дещо більшому, ніж зазначено в МЕК, а саме до  $x_s = 3,529$ , при якому розбіжність між реальною і апроксимуючою функціями становить 0,798 %.

У той же час із залежностей на рис. 6 видно, що наведена в стандарті залежність справедлива для досить обмеженого діапазону частот. Крім цього, на тій же частоті, чим вище перетин провідника, тим інтенсивніше проявляється розбіжність між реальною і емпіричною залежностями.

Провівши аналіз функції виразу (32), побудованого на підставі функцій Бесселя на діапазоні частоти вище критичної частоти  $F_{crit}$ , при якій  $x_s > 2,8$ , зроблено висновок, що вона веде себе як класична параболічна функція  $k\sqrt{f}$ , а амплітуда її залежить від частоти. Пропонується для

діапазону високих частот вище за  $F_{crit}$ , при яких  $x_s > 2,8$ , застосування такої апроксимуючої функції, що визначає значення еквівалентного значення опору провідника від поверхневого ефекту у функції частоти струму та радіуса провідника:

$$R = R' \cdot (1 + y_{s2}); \quad (37)$$

$$y_{s2} = \pi \cdot r \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho \cdot 10^7}} - 0,735. \quad (38)$$

Збіжність запропонованого апроксимованого виразу (38) і залежності функцій Бесселя (32) для проводів з жилами радіусом 5 мм і 2 мм наведено на рис. 7 (1 – відповідно до виразу Бесселя, 2 – відповідно до апроксимованих виразів). На рис. 7, а наведено залежності відносного активного опору проводу радіусом 5 мм від частоти. На рис. 7, б наведено залежності відносного активного опору проводу радіусом 2 мм від частоти.

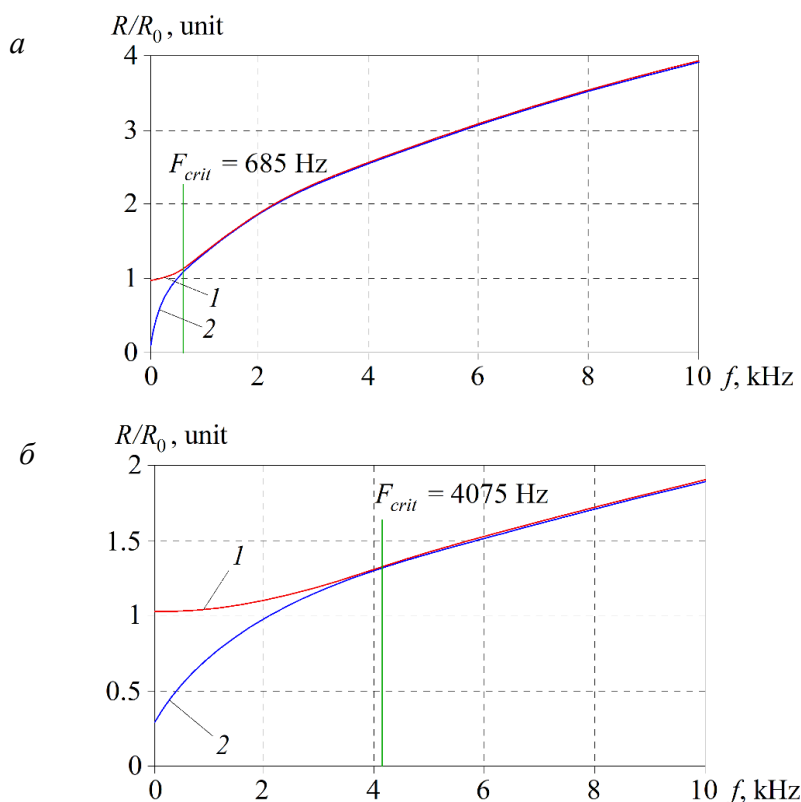


Рис. 7. Залежності відносного активного опору проводу з радіусом від частоти:  
а –  $r = 5$  мм; б –  $r = 2$  мм

Як видно з рис. 7, запропонований апроксимований вираз (38) для діапазону частоти вище  $F_{crit}$  дає змогу отримати близьку збіжність значення активного опору провідника з урахуванням скін-ефекту, не вдаючись до розв'язання досить складних рівнянь залежності опору від частоти за рівняннями Бесселя (11)–(14). Більша частина струму протікає біля зовнішньої сторони проводу. Розподілення струму в розрізі формулюється за допомогою функцій Бесселя, що визначається властивостями матеріалу, частотою та діаметром проводу.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– для розрахунку втрат потужності в залізничній системі електропостачання подано точні аналітичні вирази, отримані шляхом розв'язання рівнянь Бесселя, що визначають залежність активного опору провідника від частоти. Рівняння дають змогу визначити залежності розподілення щільності струму та еквівалентного опору провідника у функції частоти струму;

– проаналізовано емпіричні вирази міжнародного стандарту МЕК 60287-1-1-2009, які визначають залежність активного опору від частоти. Показано, що їх застосування є обмеженим у зв'язку з тим, що вони є точними лише в обмеженому діапазоні частот до величини  $F_{crit}$ . Проаналізовано

збіжність виразу (32) з МЕК 60287-1-1-2009 з розрахунком відповідно до рівнянь Бесселя. Для мідного проводу з перетином 8 мм в діапазоні частот від 0 Гц до  $F_{crit} = 1070,96$  Гц відносна похибка розрахунку не перевищувала значення 0,11 %. З подальшим зростанням частоти похибка розрахунку істотно зростає до 100 % і вище; – шляхом апроксимації рівнянь Бесселя для залежностей активного опору від частоти при різних значеннях частоти струму та радіуса провідника запропоновано новий вираз, що визначає залежність активного опору від частоти струму під дією поверхневого ефекту для діапазону високих частот вище за значення  $F_{crit}$ . Виконано аналіз збіжності запропонованої апроксимуючої функції з точним аналітичним виразом (38) опору від частоти. Максимальна відносна похибка розрахунку відносного опору мідного проводу з перетином 8 мм склала менше 0,9 %, що цілком можна застосувати для інженерних розрахунків.

*Роботу виконано в рамках теми, що фінансується за рахунок коштів загального фонду державного бюджету України «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (ДРН 0121U109440).*

### Список використаних джерел

1. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 8 (109). P. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
2. Scherback Ya. V., Plakhtiy O. A., Nerubatskiy V. P. Control characteristics of active four-quadrant converter in rectifier and recovery mode. *Technical Electrodynamics*. 2017. Vol. 6. P. 26–31. DOI: 10.15407/techned2017.06.026.
3. Kirichenko M. V., Zaitsev R. V., Dobrozhan A. I., Khrypunov G. S., Kharchenko M. M. Adopting of DC magnetron sputtering method for preparing semiconductor films. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering*. 2017. P. 108–111. DOI: 10.1109/YSF.2017.8126600.

4. Методи боротьби з кондуктивною завадоємісією у зворотногоходових перетворювачах / О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. А. Гордієнко, Г. А. Хоружевський, М. Е. Орлов. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. № 1. С. 3–13. DOI: 10.18664/iksz.v25i1.198645.
5. Визначення дії скін-ефекту на додаткові втрати потужності від вищих гармонік в електричних мережах / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, Д. А. Гордієнко, Д. А. Шелест. Тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 27–29 квітня 2021 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 139–141.
6. Zamaruiev V., Ivakhno V., Styslo B. Anti-Aliasing Filter in Digital Control System for Converter with Active Power Filter Function. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2019. P. 797–801. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783951.
7. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT-transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Scientific bulletin of National mining university*. 2020. Vol. 2 (176). P. 82–88. DOI: 10.33271/nvngu/2020-82.
8. Vamanan N., John V. Dual-Comparison One-Cycle Control for Single-Phase Bidirectional Power Converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018. Vol. 54. No. 5. P. 4621–4631. DOI: 10.1109/TIA.2018.2836359.
9. Lyutarevich A. G., Vyrva A. A., Dolinger S. Yu., Osipov D. S., Chetverik I. N. Estimation of additional power losses due to higher harmonics in elements of power system. *Omskiy nauchniy vestnik*. 2009. Issue 1. P. 109–113.
10. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Tsybulnyk V., Philipjeva M., Korneliuk S. Energy efficient conversion system of a distributed solar photovoltaic station with power filtration function. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Issue 5. P. 214–217.
11. Ruehli A. E., Antonini G., Jiang L. J. Skin-Effect Loss Models for Time- and Frequency-Domain PEEC Solver. *Proceedings of the IEEE*. 2013. Vol. 101. No. 2. P. 451–472. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2220312.
12. Riba J.-R. Analysis of formulas to calculate the AC resistance of different conductors configurations. *Escola d'Enginyeria d'Igualada, Universitat Politècnica de Catalunya*. 2015. P. 1–21.
13. Duran I. C., Duarte O. G., Pavas A. Low voltage conductor's ampacity derating due to stationary disturbances. *VII Simposio Internacional sobre. Calidad de la Energia Electrica*. 2013. P. 1–6.
14. Blahnik V., Talla J. Single-phase synchronization for traction active rectifier. *International Conference on Applied Electronics (AE)*. 2016. P. 23–26. DOI: 10.1109/ae.2016.7577233.
15. Жежеленко И. В. Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения. *Электрика*. 2010. № 4. С. 3–6.
16. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Karpenko N. P. Simulation of power losses in the frequency converter. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. Issue 16. Part 1. P. 44–57. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-16-01-035.
17. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Sushko D., Hordiienko D., Khoruzhevskyi H. Improving the harmonic composition of output voltage in multilevel inverters under an optimum mode of amplitude modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2. No. 8 (104). P. 17–24. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200021.
18. Torre J. L., Barros L. A., Afonso J. L., Pinto J. G. Development of a Proposed Single-Phase Series Active Power Filter without External Power Sources. *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. 2019. DOI: 10.1109/sest.2019.8849010.

19. Venkatramanan D., Bharadwaj P., Adapa A. K., John V. Power Conversion Technologies for High-Performance AC Micro-grid. *INAE Letters*. 2019. Vol. 4 (1). P. 27–35. DOI: 10.1007/s41403-018-00062-6.
  20. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskyi H. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multi-level inverters. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Issue 3. P. 118–121.
  21. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Kavun V. Ye., Hordiienko D. A. Active single-phase four-quadrant rectifier with improved hysteresis modulation algorithm. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2019. Vol. 5 (173). P. 93–98. DOI: 10.29202/nvngu/2019-5/16.
  22. Aronov L. V. Method for calculating the active resistance of a cylindrical wire taking into account the surface effect. *Young scientist*. 2016. No. 12 (116). P. 202–205.
- 

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Плахтій Олександр Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Хоружевський Григорій Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 000-23-34.

E-mail: khoruzhevskyi@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2042-4938.

Філіп'єва Марина Віталіївна, аспірантка кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 578-41-96.

E-mail: marifil2603@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6499-7493.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Alexandr Andreevych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Hordiienko Denys Anatolievych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Khoruzhevskyi Hryhorii Anatolievych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (099) 000-23-34.

E-mail: khoruzhevskyi@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2042-4938.

Philipjeva Marina Vitalievna, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (066) 578-41-96.

E-mail: marifil2603@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6499-7493.

Статтю прийнято 18.08.2021 р.



**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)**

---

УДК 625.17

**ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ НЕБЕЗПЕЧНОЇ ШИРИНИ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ НА ЗАЛІЗОБЕТОННІЙ ОСНОВІ ЗІ СКРІПЛЕННЯМИ ТИПУ КБ З УРАХУВАННЯМ УСІХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ**

Старш. викл. В. В. Новіков, канд. техн. наук А. О. Бабенко, асп. О. С. Харківський, викл. О. О. Ткаченко

**DETERMINATION OF THE MAXIMUM DANGEROUS WIDTH OF A RAIL TRACK ON A REINFORCED CONCRETE BASE WITH FASTENERS OF THE KB TYPE, TAKING INTO ACCOUNT ALL INFLUENCING FACTORS**

Senior Lecturer V. V. Novikov, PhD (Tech.) A. O. Babenko, postgraduate student O. S. Kharkivskiy, teacher O. O. Tkachenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248306>

---

***Анотація.** Обґрунтовано необхідність урахування нових досліджених автором факторів впливу на небезпечну ширину рейкової колії з проміжними рейковими скріпленнями роздільного типу залежно від діапазонів вантажонапруженості ділянок і ремонтних профілів коліс рухомого складу, а також процесів зносу проміжних рейкових скріплень типу КБ і його елементів на появу пружних горизонтальних люфтів у вузлах скріплення від впливу спрямовувальних коліс рухомого складу. Враховано детерміновані залежності бічних відтискань головки рейкової нитки типу Р65 від одночасного впливу вертикальних і горизонтальних сил для встановлених ремонтних профілів коліс рухомого складу. Рекомендовано значення максимальної безпечної ширини рейкової колії для ділянок, де застосовується службове або екстрене гальмування.*

***Ключові слова:** фактори впливу, нові ремонтні профілі коліс, небезпечна ширина рейкової колії, розпір колії.*

***Abstract.** Railway track retention standards in Ukraine do not take into account the construction of the subrail base, but regulate one for all types maximum dangerous value of the track width, which was changed from 1546 mm to 1548 mm without any justification of scientific research or explanations of the effects of tolerances the width of the rail track and the wheel track, which in general at that time were not fully investigated but taking into account the emergence and development of new scientific problems associated with the emergence of intensive lateral wear of rails and ridges of locomotive and wagon wheels. The deterministic dependences of lateral impressions of the P65 type rail thread head on the simultaneous influence of vertical and horizontal forces for the newly installed repair profiles of UZ rolling stock on the basis of previously performed experimental and theoretical studies were investigated. The results allow at this stage of research to determine and calculate the practical values of the maximum dangerous width of the track, in which the subrail base consists of reinforced concrete sleepers and separate rail fasteners, which are used both on conventional highways with mixed traffic and on high-speed lines UZ.*

*The article establishes the need to take into account new factors influencing the dangerous width of the rail track with intermediate rail fasteners of separate type depending on the load stress*

of sections and new repair profiles of rolling stock, as well as wear processes of intermediate rail fasteners type KB and its elements on the appearance of elastic backlash in the lateral direction from the influence of the guide wheels of the rolling stock. The recommended value of the maximum width of the rail track for areas where service or emergency braking is applied - 1550 mm, taking into account that the contact of the wheel and the rail is not at a point, but on an ellipse. The established norm of the maximum width of a rail track allows to define economic efficiency of introduction in the conditions of operation of a track in curved sections of a track of small radii with limited use of the maximum admissible lateral wear (15 mm) of a head of a rail thread provided that the normal-forced entry of rolling stock carts.

**Keywords:** subrail base, new wheel repair profiles of rolling stock, track width.

**Вступ.** Сучасні уявлення про можливість розпирання колії з падінням (провалюванням) колеса в колію з залізобетонною підрейковою основою базуються на твердженні, що явище розпирання колії виникає, коли обід колеса спирається фаскою на початок заокруглення головки рейки. Але дослідження, на яких базується сучасна нормативна величина максимальної дозволеної ширини рейкової колії при дозволеній реалізації встановлених максимальних швидкостях руху – 1545 мм – була отримана на допущеннях і положеннях про одночасне існування на одній напрямній осі візка двох різних за станом коліс. Тобто одне колесо жодним чином не зношене, а інше зношене вкрай до мінімальної товщини гребеня. Такий стан є неможливим і не може бути підставою для створення нормативної величини для колійного господарства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні уявлення про можливість розпирання колії з падінням (провалюванням) колеса в колію з залізобетонною підрейковою основою базуються на твердженні, що явище розпирання колії виникає, коли обід колеса спирається фаскою на початок заокруглення головки рейки [8]. При цьому положенні колеса критична величина відтискання головки рейки в кривих ділянках з максимальною шириною колії 1545 мм, при якій дозволяється рух із встановленими швидкостями, становила 30 мм. На сьогодні існують дослідження зміни положення колії в кривих малих радіусів у площині з

дерев'яними та залізобетонними шпалами зі скріпленнями ДО і СКД65-Б відповідно [4]. Але не опубліковано досліджень для колії на залізобетонній основі зі скріпленнями KB65, де враховуються умови виникнення розпирання колії, особливо при введенні в експлуатацію спеціальних ремонтних профілів [5] з урахуванням додаткових факторів впливу.

**Визначення мети і завдання дослідження.** Метою дослідження є визначення детермінованих залежностей бічних відтискань головки рейкової нитки типу Р65 від одночасного впливу вертикальних і горизонтальних сил для нових встановлених ремонтних профілів рухомого складу УЗ на підставі раніше виконаних експериментальних і теоретичних досліджень [1, 2, 6, 7]. Результати дозволяють на цьому етапі досліджень визначити і розрахувати практичні значення максимальної небезпечної ширини рейкової колії, у якій підрейкова основа складається з залізобетонних шпал і підкладочних роздільних рейкових скріплень, які використовують як на звичайних магістралях зі змішаним рухом, так і швидкісних лініях УЗ, для яких це є актуальним на кінець 2021 року [3]. Вихідні дані для виконання розрахунків небезпечної ширини рейкової колії наведено в табл. 1.

**Основна частина.** Для визначення максимальної небезпечної ширини рейкової колії з урахуванням усіх факторів впливу запропоновано методику розрахунків згідно з розрахунковою схемою на рисунку.

Таблиця 1

Вихідні дані для виконання розрахунків небезпечної ширини рейкової колії

Ремонтний профіль (нормативна база)	Тип рухомого складу	$c$ , мм	$a$ , мм	$m_2$	$h_0$ , мм	$P_{ст}$ , кН	$\alpha_{нп}$ , м/с <sup>2</sup>	$\varepsilon_{q(\Delta t)}$ , мм	$\mu$ , мм
ДПТ-УЗ (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, а)	вантажні вагони	20	130	3,5	33	105,0	0,3	10,0	1,0
	пасажирські вагони	20	130	3,5	33	71,25	0,7	0,0	1,0
ГОСТ 9036-38 (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, б)	вантажні вагони	30	130	10	33	105,0	0,3	10,0	1,0
	пасажирські вагони	30	130	10	33	81,0	0,7	0,0	1,0
Профіль вантажних і рефрижераторних вагонів (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, в)	вантажні вагони	30	130	10	30	105,0	0,3	10,0	1,0
	рефрижераторні вагони	30	130	10	30	81,0	0,7	0,0	1,0
ДСТУ ГОСТ 11018- 2005 шабл. РЛ 1 МУ 23311.3514.002 (ВНД- 32.0:07.001-2001, рис. 6.16)	ЧС-4	40	140	3,5	33	102,5	0,7	0,0	0
	ТЕП-60	40	140	3,5	33	107,5	0,7	0,0	0
Креслення 4. ДСТУ ГОСТ 001ТУУ 23111.3534-002 (ВНД-32.0:07. 001-2001 рис. 6.17)	вантажні вагони	30	130	3,5	32,318	81,0	0,7	0,0	1,0
	пасажирські вагони								
За кресленням 2 ГОСТ 9036 (ВНД-32.0:07.001-2001, рис. 6.18)	вантажні вагони	30	130	10	32,318	105,0	0,3	10,0	1,0
	пасажирські вагони								

1. Максимальна ширина колії, за якою відбувається падіння (провальовання) колеса в колію, визначається за формулою

$$S_{\max-пров}^{неб} = q_{\min} + a - \Delta a - \phi - d, \quad (1)$$

де  $q_{\min}$  – мінімальна ширина колісної пари;  
 $a$  – ширина обода за кресленнями (табл. 2);  
 $\Delta a$  – допуск на звуження обода колеса при виготовленні (4 мм);  $\phi$  – ширина фаски на ободі колеса (6 мм);  $d$  – горизонтальна проєкція радіуса заокруглення бічної робочої грані головки рейки (12 мм).

Мінімальна ширина колісної пари  $q_{\min}$  визначається за формулою

$$q_{\min} = h_0 + \mu + T_{\min} - \varepsilon_q - \varepsilon_{q(\Delta t)},$$

де  $h_0$  – товщина гребеня колеса, мм;  $\mu$  – потовщення гребеня колеса;  $T_{\min}$  – мінімальна ширина насадки коліс (1437 мм);  $\varepsilon_q$  – зміна ширини колісної пари за рахунок вигину осі колісної пари (2 мм);  $\varepsilon_{q(\Delta t)}$  – зміна ширини колісної пари за рахунок перегріву ободів коліс при службовому гальмуванні (10 мм).

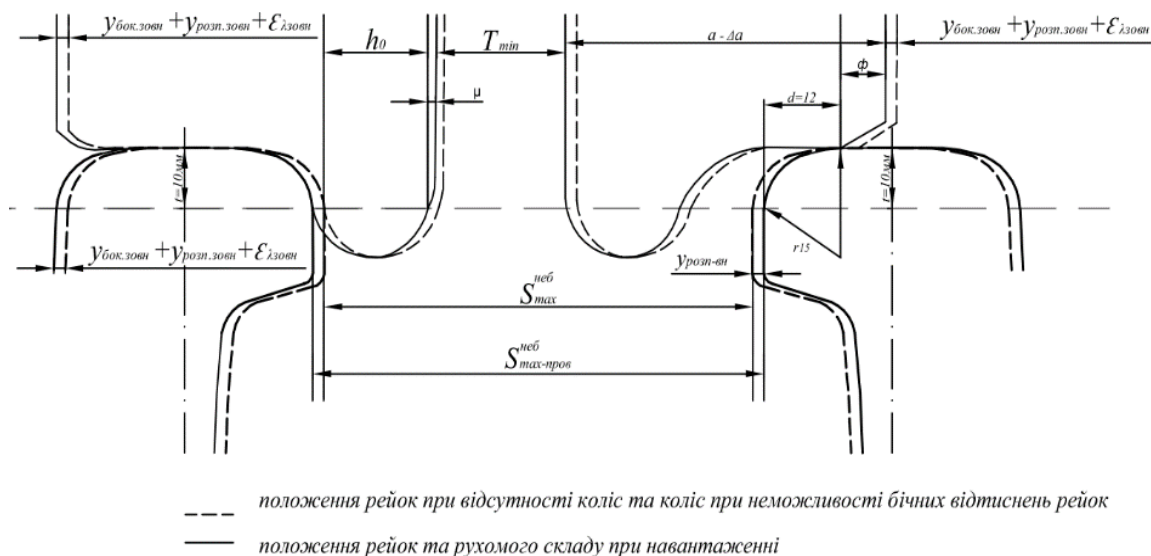


Рис. Розрахункова схема для визначення максимальної небезпечної ширини рейкової колії

2. Сила розпору визначається за формулою

$$Y_m = \frac{P_v}{m}, \quad (2)$$

де  $P_v$  – вертикальне навантаження;  
 $m$  – конусність поверхні кочення колеса.

Твірна конусної поверхні кочення колеса створює кут  $\alpha_m$  з площиною поверхні кочення головок рейок. Тоді  $\operatorname{tg} \alpha_m = \frac{l}{m}$ , і через подібність процесу розпирання до процесу розклинення можна вважати, що сила розпору дорівнює

$$Y_m = P_v \cdot \operatorname{tg} \alpha_m = \frac{P_v}{m}.$$

3. Величина бічної сили, що передається від колеса, що направляє,

$$H_{\sigma} = (a_{\sigma} + b_{\sigma} \alpha_{nn}), \quad (3)$$

де  $a_{\sigma}$ ,  $b_{\sigma}$  – коефіцієнти з графіків-паспортів і формули для визначення бічної сили, приймається за рухомим складом.

4. Величина сумарного розпирання обох рейкових ниток визначається за виразом

$$\begin{aligned} \Sigma y_{розп} &= y_{бок-зовн} + y_{розп-зовн} + y_{розп-внутр} = (A + B \cdot P_v) H_{\sigma} + (A + B \cdot P_v) Y_m + (A + B \cdot P_v) Y_m = \\ &= (A + B \cdot P_v) H_{\sigma} + 2(A + B \cdot P_v) Y_m = (A + B \cdot P_v) (H_{\sigma} + 2Y_m), \end{aligned} \quad (4)$$

де  $A$ ,  $B$  – емпіричні коефіцієнти для визначення бічних відтискань головки рейки при одночасній дії вертикальних і бічних сил;  $H_{\sigma}$  – бічна сила;  $P_v$  – вертикальне навантаження;  $Y_m$  – сила розпирання.

5. Теоретична максимальна ширина рейкової колії

$$S_{max-теор}^{неб} = S_{max-пров}^{неб} - \Sigma y_{розп} - \epsilon_{\lambda-зовн}. \quad (5)$$

6. Практична максимальна ширина рейкової колії

$$S_{max-практ}^{неб} = S_{max-теор}^{неб} - \frac{b_{ел}}{2}. \quad (6)$$

Отримані результати розрахунків максимальної ширини рейкової колії для ділянок руху рухомого складу для умов застосування службового або екстреного гальмування та окремо для умов руху до застосування службового або екстреного

гальмування, наведені в табл. 2 та 3. Окремо в табл. 4 наведено сумарні величини пружних розширювань колії за рахунок відтискань головок рейок під впливом бічної сили одночасно з силами розпирання.

Таблиця 2

Результати розрахунків максимальної небезпечної ширини рейкової колії для ділянок руху рухомого складу, де застосовано службове гальмування

Ремонтні профілі (нормативна база)	Тип рухомого складу	$\Gamma_0 < 40$ $\frac{\text{млн ткм брутто}}{\text{км/р.}}$				$\Gamma_0 \geq 41$ $\frac{\text{млн ткм брутто}}{\text{км/р.}}$			
		$S_{\text{max-пр}}^{\text{неб}}$ , мм	$S_{\text{розп}}$ , мм	$S_{\text{неб}}$ , (теор) мм	$S_{\text{неб}}$ , (практ) мм	$S_{\text{max-пр}}^{\text{неб}}$ , мм	$S_{\text{розп}}$ , мм	$S_{\text{неб}}$ , (теор) мм	$S_{\text{неб}}$ , (практ) мм
ДПТ-УЗ (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, а)	вант. ваг.	1561	1548	1558	1555	1561	1548	1557	1554
	пас. ваг.	1563	1550	1558	1555	1563	1549	1557	1554
	вант. ваг.	1564	1550	1559	1556	1564	1550	1558	1555
	пас. ваг.	1564	1550	1559	1556	1564	1550	1558	1555
ГОСТ 9036-38 (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, б)	вант. ваг.	1561	1537	1559	1556	1561	1537	1558	1556
	пас. ваг.	1563	1539	1559	1556	1563	1539	1558	1556
	вант. ваг.	1573	1549	1570	1567	1573	1549	1569	1566
	пас. ваг.	1573	1549	1570	1567	1573	1549	1569	1566
Профіль вантажних і рефрижераторних вагонів (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, в)	вант. ваг.	1568	1534	1556	1553	1568	1534	1555	1552
	рефр. ваг.	1570	1536	1556	1553	1570	1536	1555	1552
	вант. ваг.	1570	1546	1567	1564	1570	1546	1566	1563
ДСТУ ГОСТ 11018-2005 шабл. РЛ 1 МУ 23311.3514.002 (ВНД-32.0:07.001-2001 рис. 6.16)	ЧС-4	1580	1546	1576	1573	1580	1546	1575	1572
	ТЕП-60	1580	1546	1576	1573	1580	1546	1575	1572
Креслення 4. ДСТУ ГОСТ 001ТУУ 23111.3534-002 (ВНД-32.0:07.001-2001 рис. 6.17)	пас. ваг.	1573	1549	1568	1565	1573	1549	1567	1565
	вант. ваг.	1573	1549	1568	1565	1573	1549	1567	1565
За кресленням 2 ГОСТ 9036 (ВНД-32.0:07.001-2001, рис. 6.18)	вант. ваг.	1557	1533	1555	1552	1557	1533	1554	1552
	пас. ваг.	1559	1535	1555	1552	1559	1535	1555	1552

Таблиця 3

Результати розрахунків максимальної небезпечної ширини рейкової колії для ділянок руху рухомого складу, де не застосовано службове гальмування

Ремонтні профілі (нормативна база)	Тип рухомого складу	$\Gamma_0 < 40$ $\frac{\text{млн ткм брутто}}{\text{км/р.}}$				$\Gamma_0 \geq 41$ $\frac{\text{млн ткм брутто}}{\text{км/р.}}$			
		$S_{\text{max-пр}}^{\text{неб}}$ , мм	$S_{\text{розп}}$ , мм	$S_{\text{неб}}^{\text{неб}}$ , (теор) мм	$S_{\text{неб}}^{\text{неб}}$ , (практ) мм	$S_{\text{max-пр}}^{\text{неб}}$ , мм	$S_{\text{розп}}$ , мм	$S_{\text{неб}}^{\text{неб}}$ , (теор) мм	$S_{\text{неб}}^{\text{неб}}$ , (практ) мм
ДПТ-УЗ (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, а)	вант. ваг.	1571	1548	1568	1565	1571	1548	1567	1564
	пас. ваг.	1574	1560	1569	1566	1574	1560	1568	1565
ГОСТ 9036-38 (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, б)	вант. ваг.	1571	1547	1569	1556	1566	1537	1558	1556
	пас. ваг.	1573	1549	1570	1567	1573	1549	1569	1566
Профіль вантажних і рефрижераторних вагонів (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, в)	вант. ваг.	1568	1544	1566	1563	1568	1544	1565	1562
	рефр. ваг.	1568	1544	1566	1563	1568	1544	1565	1562
ДСТУ ГОСТ 11018-2005 шабл. РЛ 1 МУ 23311.3514.002 (ВНД-32.0:07.001-2001, рис. 6.16)	ЧС-4	1580	1546	1576	1573	1580	1546	1575	1572
	ТЕП-60	1580	1546	1576	1573	1580	1546	1575	1572
Креслення 4. ДСТУ ГОСТ 001ТУУ 23111.3534-002 (ВНД-32.0:07.001-2001, рис. 6.17)	пас. ваг.	1573	1549	1568	1566	1573	1549	1567	1565
За кресленням 2 ГОСТ 9036 (ВНД-32.0:07.001-2001, рис. 6.18)	вант. ваг.	1567	1543	1562	1560	1567	1543	1563	1560

**Висновки.** Аналіз отриманих результатів дає змогу рекомендувати значення максимальної ширини рейкової колії для ділянок, де застосовується

службове або екстремне гальмування, – 1550 мм, з урахуванням того, що контакт колеса і рейки відбувається не в точці, а по еліпсу з шириною напівосі  $b_{el} = 2$  мм.

Таблиця 4

Сумарні величини пружних розширювань колії за рахунок бічних відтискань головок рейок під впливом бічної сили ( $\Sigma y_6$ )

Ремонтні профілі (нормативна база)	Тип рухомого складу	$\Gamma_0 < 40$ $\frac{\text{млн ткм бруто}}{\text{км/р.}}$		$\Gamma_0 \geq 41$ $\frac{\text{млн ткм бруто}}{\text{км/р.}}$	
		при $P_e = P_{cm} \cdot k_g$	при $P_e = P_{cm}$	при $P_e = P_{cm} \cdot k_g$	при $P_e = P_{cm}$
ДПТ-УЗ (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, а)	вант. ваг.	3,35	5,08	4,23	6,38
	пас. ваг.	4,45	4,36	5,60	5,47
ГОСТ 9036-38 (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, б)	вант. ваг.	1,90	3,45	2,40	4,33
	пас. ваг.	2,80	3,0	3,50	3,75
Профіль вантажних і рефрижераторних вагонів (ЦТ-ЦЛ-0062, рис. 5, в)	вант. ваг.	1,90	3,45	2,40	4,08
	рефр. ваг.	2,8	3,0	3,50	3,75
ДСТУ ГОСТ 11018-2005 шабл. РЛ 1 МУ 23311.3514.002 (ВНД-32.0:07.001-2001, рис. 6.16)	ЧС-4	3,7	6,03	4,43	7,46
	ТЕП-60	3,3	5,29	4,17	6,65
Креслення 4. ДСТУ ГОСТ 001ТУУ 23111.3534-002 (ВНД-32.0:07.001-2001, рис. 6.17)	пас. ваг.	4,46	6,05	5,60	5,55
За кресленням 2 ГОСТ 9036 (ВНД-32.0:07.001-2001, рис. 6.18)	вант. ваг.	1,9	3,3	2,4	4,1

При рекомендованому значенні максимальної ширини рейкової колії, але не більше, можна дозволити рух зі встановленими швидкостями, якщо всі зазначені в табл. 3 одиниці рухомого складу допущено до руху на таких ділянках колії.

Встановлена норма максимальної ширини рейкової колії дозволяє визначити

економічну ефективність впровадження в умовах експлуатації колії в кривих ділянках колії малих радіусів з обмеженим використанням максимального допустимого бічного зносу (15 мм) головки рейкової нитки за умови забезпечення нормально-примусового вписування екіпажів (візків) рухомого складу.

#### Список використаних джерел

1. Новиков В. В., Скорик А. А., Панченко С. В. Исследование условий распора колеи со скреплениями типа КБ и его влияние на определение опасной ширины рельсовой колеи. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 178. С. 14–20.

2. Новіков В. В., Скорик О. О. Результати експериментальних вимірювань пружних бічних відтискань головки рейкової нитки при взаємодії горизонтального та вертикального. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2015. Вип. 157. С. 51–54.

3. Potapov D. O., Vitolberg V. G., Malishevskaya A. S., Plis P. V., Trishchun R. M. Predictive assessment of change of basic geometric characteristics of rail track during the operation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 8th International Scientific Conference on Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings*, TRANSBUD 2019, Kharkiv, 20 November 2019 - 22 November 2019, 156807. Article number 012021.

4. Markul R., Hubar O., Arbuzov M., Andrieiev V., Tiuthin O., Savyts'Kyу V., Ganich R. Investigation of the operation of the railway track with reinforced concrete sleepers in curved sections with radius  $R \leq 350$  m. *Transport Means – Proceedings of the International Conference. 24th International Scientific Conference on Transport Means*. Kaunas, 30 September 2020 - 2 October 2020. P. 520–527. 164801

5. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм: ВНД 32.0.07.001-2001 (Нова редакція). Київ: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2011. 170 с.

6. Даніленко Е. І., Твердомед В. М. Розрахунок поперечних горизонтальних сил, діючих на колію в кривих від рухомого складу, графо-аналітичним методом. *Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія: Транспортні системи і технології*. Київ, 2012. Вип. 21. С. 71-76.

7. Про необхідність внесення змін в існуючі нормативні допуски по ширині рейкової колії у прямих та кривих при впровадженні швидкісного руху поїздів на залізницях України / Е. І. Даніленко, М. І. Карпов, В. М. Молчанов, Р. М. Йосифович. *Залізничний транспорт України*. Київ, 2014. № 2. С. 9-17.

8. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: Транспорт, 1987. 479 с.

---

Новіков Вадим Володимирович, старший викладач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (057) 730-10-55.

E-mail: novikoff.vadim2013@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-9341-0129.

Бабенко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (057) 730-10-55.

E-mail: babenko\_ngkg@kart.edu.ua. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X.

Харківський Олександр Сергійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: kharsanya2806@gmail.com.

Тел.: (050) 026-48-20. ORCID iD: 0000-0002-1222-9422.

Ткаченко Олена Олександрівна, викладач кафедри будівництва та цивільної інженерії Харківського державного автомобільного коледжу. Тел.: 0663337200. E-mail: elena82kanaxa@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1953-5000.

Novikov Vadym, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38(057) 730-10-55. E-mail: novikoff.vadim2013@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-9341-0129.

Babenko Andriy, PhD (Tech.), Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38(057) 730-10-55. E-mail: babenko\_ngkg@kart.edu.ua. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X.

Kharkivskiyi Oleksandr, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (050) 026-48-20.

E-mail: kharsanya2806@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1222-9422.

Tkachenko Olena Olexandrivna, Teacher, Department of Construction and Civil Engineering, Kharkiv State Automobile and Road College. Tel.: 0663337200. E-mail: elena82kanaxa@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1953-5000.

Статтю прийнято 25.08.2021 р.



УДК 656.612:629.54

## ОГЛЯД ОСНОВНИХ МЕХАНІЗМІВ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ ТА КОНТРОЛЮ ЗА ВИКИДАМИ З МОРСЬКИХ СУДЕН

Д-р екон. наук С. П. Онищенко, кандидати техн. наук О. М. Мельник, А. О. Волошин, Є. В. Калініченко, старш. викл. С. В. Заяц

## REVIEW OF THE BASIC MECHANISMS OF ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT AND EMISSIONS CONTROL FROM SHIPS

D. Sc. (Econ.) S. Onyshchenko, PhD (Tech.) O. Melnyk, PhD (Tech.) A. Voloshyn, PhD (Tech.) Ye. Kalinichenko, Senior Lecturer S. Zaiats

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248314>

---

**Анотація.** Щороку динаміка впровадження проєктів, що спрямовані на підвищення енергоефективності використання енергоносіїв, поступово зростає на різних рівнях і у різних галузях промисловості. Своє поширення вона знайшла в галузях проєктування, модернізації та реконструкції енергоефективних будівель та споруд, конструюванні та будівництві елементів виробничої інфраструктури, технологічних процесах виробництва. Впровадження таких проєктів є пріоритетним напрямом діяльності для підприємств і компаній різних видів економічної діяльності. Відповідно до цього, у провідних галузях промисловості розробляються стратегії підвищення рівня екологічної безпеки і енергоефективності (і суднопластво не є винятком, де процес підвищення енергоефективності відбувається різними засобами, що у підсумку приводить до скорочення обсягів викидів у повітря забруднювальних речовин), втім негативно позначаються на показниках комерційної експлуатації судна. Проблеми забезпечення енергоефективності поряд з підвищенням вимог до забезпечення екологічної безпеки транспорту та посилення відповідальності судновласників стають центральним об'єктом досліджень сучасної теорії і практики експлуатації засобів морського транспорту. Актуальними також залишаються питання вдосконалення універсальних принципів енергоефективності в рамках окремих судноплавних компаній і розроблення інструментів економічного аналізу енергетичної ефективності власного флоту, пошуку нових способів щодо формування професійних компетенцій членів екіпажів суден у галузі енергозбереження.

**Ключові слова:** енергоефективність судна, індекс проєктування, план управління енергоефективністю.

**Abstract.** Increasing relevance of the problem of energy conservation and use of alternative sources of energy in connection with global and local resource crises led to the formation of a developed system of international standards in the field of energy management, which is aimed at regulating and disclosing the content of the principles of energy efficient processes and development. Rational policy in enterprises of various industries and the implementation of energy-saving measures, particularly in the maritime transport. The dynamics of implementation of projects aimed at increasing the efficiency of energy use is growing steadily at different levels and in different sectors of industry. It is widespread in the fields of design, modernization and reconstruction of energy-efficient buildings and structures, construction of industrial infrastructure elements, technological production processes. Implementation of such projects is a priority line of activity for enterprises and

*companies of various types of economic activity. Accordingly, the leading sectors of industry develop strategies to improve environmental safety and energy efficiency - ship navigation is no exception. Indeed, the process of increasing energy efficiency is achieved by reducing fuel consumption, which without exception leads to a reduction in the amount of waste products discharged into the atmosphere. Therefore, the problems of energy efficiency in order to increase requirements for environmental safety of transport and increasing responsibility of shipowners become the central object of research of current theory and practice of operation of maritime transport means. Another urgent issue is the improvement of universal principles of energy efficiency within the framework of individual ship-owning companies and the development of tools for economic analysis of energy efficiency of the own fleet, search for new ways to form professional competencies of ship crewmembers in the field of energy conservation.*

**Keywords:** *ships energy efficiency, design index, management plan.*

**Вступ.** Морський транспорт залишається без перебільшення основним видом транспорту для переважної більшості вантажів, що складаються із зернових, сировини, небезпечних та унікальних вантажів, таких як негабаритні та важковагові вантажі, оскільки вартість їх транспортування залишається конкурентоспроможною і прийнятною для всіх учасників ринку. Але обсяги викидів у галузі судноплавства від більш ніж 100 тис. морських суден становить майже 3 % від загального обсягу парникових газів у світі, що викликає кліматичні зміни, такі як глобальне потепління та ацидифікація, тож судноплавство відіграє значну роль у проблемі зміни клімату. Велика частка від цього є наслідком неефективного проектування суден, а також відсутності планування та оптимального використання ресурсів. З розвитком транспортного сектора пропорційно продовжує зростання тиск на екологічну складову галузі. Як підсумок, нестабільний рівень вартості палива, підвищена потреба у природоохоронних нормах і тенденції до зменшення споживання палива є головними чинниками необхідності впровадження енергоефективних заходів на суднах, тому концепції та потреби у їх застосуванні у судноплаванні втілюються у реалії повсякденного функціонування морегосподарського комплексу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемам забезпечення енергоефективності, поряд з підвищенням

екологічної безпеки морських суден, завжди приділялась пильна увага як з боку провідних вчених у галузі водного транспорту, так і міжнародних організацій та інституцій. Так, особливості використання альтернативних видів палива розглянуто у роботах [1–3]. Засоби та методи управління енергоефективністю судна досліджено у [4–6]. Розкриття основних принципів та заходів щодо підвищення енергоефективності на суднах запропоновано у [7, 8]. Керівництво з обліку інноваційних технологій енергоефективності для розрахунку і перевірки досягнутих показників для суден у несприятливих умовах та нормативні вимоги з боку контролюючих організацій містяться у [9–11]. У [12–14, 18] проаналізовано експлуатаційні показники енергетичної ефективності судна з урахуванням впливу навігаційного середовища та оптимізації часу перебування судна в порту. Втім пошук шляхів щодо зменшення викидів шкідливих речовин з борту суден та питання підвищення енергетичної ефективності судна впровадженням різних експлуатаційних методів характеризуються високим ступенем актуальності.

**Мета і завдання дослідження.** Пропонується провести аналіз основних інструментів управління енергоефективністю судна, їх взаємозв'язок та залежність від ініціатив з боку ІМО (Міжнародна морська організація) щодо шляхів економії енергії на борту суден, комплексної оцінки

та прогнозування ефективності їх експлуатації та зменшення вуглецевого сліду в екології. Також за необхідне є проведення аналізу міжнародної нормативно-правової бази з метою пошуку шляхів вирішення проблеми викидів з суден за допомогою практичних заходів як з боку членів екіпажів суден щодо зниження споживання палива, так і осіб, які працюють у морському секторі і займаються питаннями охорони довкілля та зміни клімату.

**Основна частина дослідження.** Подібно до конвенції SOLAS (Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі), яка регулює судноплавство відповідно до мінімальних стандартів для захисту життя на морі, конвенція MARPOL (Міжнародна конвенція із запобігання забрудненню з суден) є ще однією важливою конвенцією, яка захищає морське середовище від забруднення з суден. MARPOL і SOLAS вважаються двома ефективними інструментами ІМО (Міжнародна морська організація) в галузі безпеки і захисту навколишнього

середовища. Постійний технічний розвиток і інновації є ключовими напрямками в процесі підвищення енергоефективності суден. Протягом певного періоду часу контроль за ефективним використанням енергетичних ресурсів морських суден був на добровільній основі, і очікувалося, що судновласники усвідомлюють свою відповідальність за енергоефективність власного флоту. Але у зв'язку зі зростаючим занепокоєнням з приводу збільшення обсягу викидів парникових газів (рис. 1) і збільшення споживання палива, з боку контролюючого органу морської галузі МЕРС (комітету із захисту морського середовища) ІМО було запроваджено ряд кроків щодо зниження емісії парникових газів з суден, а саме прийняття глави 4 додатка VI конвенції MARPOL, правил енергоефективності для суден. Головним завданням було запровадження двох обов'язкових механізмів – індексу проєктування енергоефективності (EEDI) та судового плану управління енергоефективністю (SEEMP).

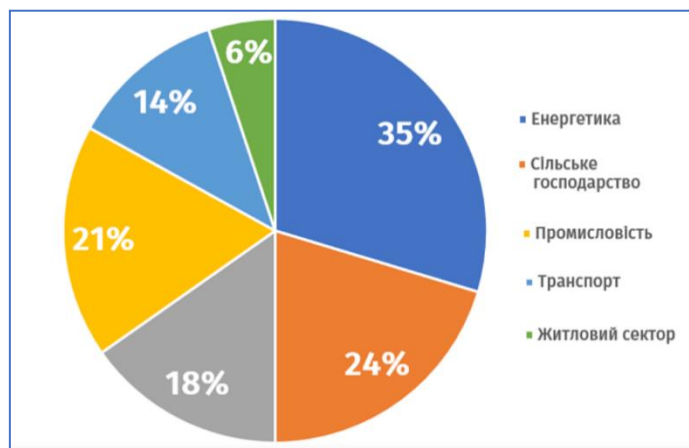


Рис. 1. Обсяг викидів парникових газів від людської діяльності

Як відомо, індекс EEDI необхідний для відстеження кількості CO<sub>2</sub> (діоксиду вуглецю) і шкідливих викидів з суден та є засобом підтримки та стимулювання розвитку стандартів енергоефективності. Ідея його впровадження полягає в тому, щоб

шляхом поліпшення конструкції корпусу судна і оптимізації роботи судових технічних систем та устаткування досягти зниження викидів CO<sub>2</sub> за рахунок підвищення загальної ефективності судна. Рівень викидів CO<sub>2</sub> розраховується на

основі витрат палива з урахуванням вмісту вуглецю. У свою чергу рівень споживання палива заснований на потужності, що використовується для пропульсивної установки та допоміжної потужності, яка вимірюється за певних проектних умов. Транспортна робота судна оцінюється як проектна потужність його силової установки, помножена на швидкість, що вимірюється по літню осадку з максимальним навантаженням, та при 75-процентній номінально встановленій потужності.

План управління енергоефективністю судна – це спеціальний інструмент (рис. 2), розроблений ІМО для вимірювання і контролю за викидами парникових газів (ПГ) з суден. Основна мета SEEMP – не тільки зниження обсягу шкідливих викидів з суден, але і підвищення ефективності їх експлуатації та зниження витрат палива.

Реалізація інструментів SEEMP і EEDI для належного контролю забруднення з суден відбувається на усіх нових суднах, що збудовані після 2013 року. Втім, план SEEMP має бути розроблений і реалізований судновласником або оператором судна для потенційного зниження експлуатаційних витрат судна, що в кінцевому підсумку має за мету зниження загальних витрат палива, включаючи шкідливі викиди в довгостроковій перспективі.

Найкращі способи оптимізації та підтримки енергоефективності судна плануються та реалізуються за допомогою плану управління енергоефективністю судна. SEEMP окреслює всі найкращі практики, які необхідно застосовувати на борту судна і в офісі судновласника для забезпечення максимальної ефективності рейсу судна.

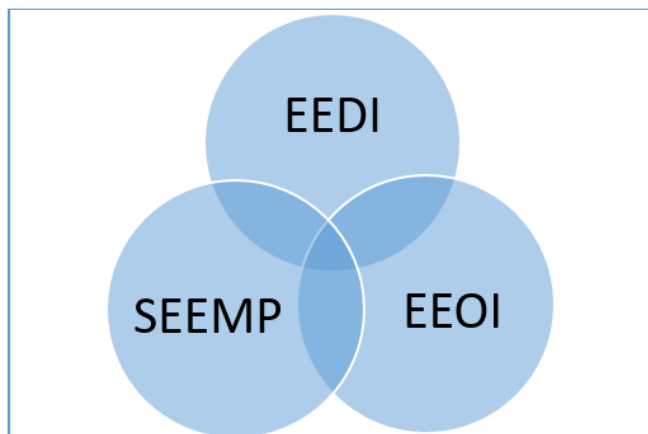


Рис. 2. Основні інструменти управління енергоефективністю судна

Критичний аналіз заходів на борту судна та якості їх упровадження можна зробити за допомогою Індексу експлуатації енергоефективності (EEOI). Основна відмінність між EEDI та EEOI полягає в тому, що перший вимірює, наскільки якісно побудовано судно, а другий – наскільки ефективно воно експлуатується. Тому ІМО було запроваджено схему розрахунку оперативного показника енергоефективності (EEOI), з тим щоб використовувати його як показник ефективності моніторингу

EEDI у поєднанні з SEEMP (рис. 2). На рис. 3 показано концепцію того, як перелічені вище інструменти працюють у комплексі, охоплюючи як процеси проектування суден, так і процеси їх експлуатації.

Велика кількість шкідливих викидів є наслідком неефективної конструкції суден, а також проблемою відсутності планування і оптимального використання ресурсів, тому головна мета нововведень з боку ІМО полягала в тому, щоб стандартизувати і координувати зусилля та шляхом введення

інструментів управління досягти стимулювання і розвитку технологічних процесів на судні у сторону більш енергоефективних стандартів. Таким чином, EEDI є технічним стандартом, що застосовується до нових суден. Проектувальники і суднобудівельники зможуть вільно вибирати технології для задоволення вимог EEDI в кожному конкретному проєкті судна. Згодом рівень EEDI буде знижуватися, що поступово сприятиме

появі більш енергоефективних суден, тим самим втілюючи технології та операції для підвищення енергоефективності в морському секторі та прискорюючи рух галузі судноплавства в більш чисте і екологічне майбутнє. Це набуває актуальності також для регіонів, особливо вразливих до наслідків зміни клімату, і де є реальна можливість просування технологій і операцій з підвищення енергоефективності в морському секторі.

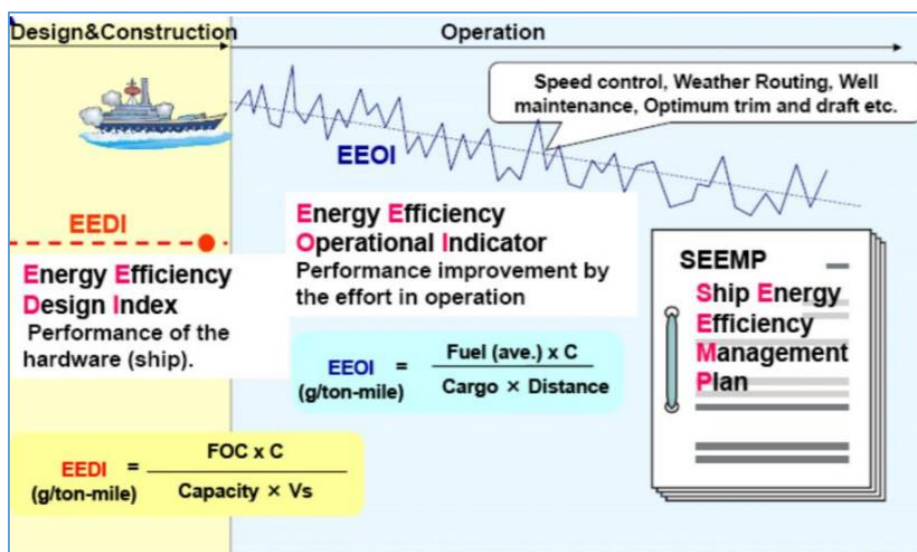


Рис. 3. Концепція взаємодії інструментів управління енергоефективністю [3].

Однією з найбільших ініціатив ІМО щодо успішної реалізації цих програм є проєкт Глобального морського партнерства з енергоефективності (GloMEEP). GloMEEP має за мету розширення рівня обізнаності та технічних можливостей судноплавних компаній по всьому світу, щоб підштовхнути морський світ до низьковуглецевого майбутнього. Іншою ініціативою є Глобальний мережевий проєкт МТСС, що фінансується з боку Європейського Союзу, який має за мету по'єднати держави, що розвиваються, та слаборозвинені країни, що є учасниками міжнародного судноплавства, з більш розвиненими в технологічному плані країнами, що може допомогти їм

скористатися технічними досягненнями останніх.

Щодо нових суден, у межах програми підвищення рівня енергоефективності, планується реалізація безлічі передових змін, що стосуються оптимізації швидкості судна, вдосконалення засобів планування рейсу і вантажних операцій у портах, удосконалення характеристик технічних систем, корпусу судна щодо його форми і розмірів, поліпшення якостей фарбового покриття та інших методів, таких як оптимізація диферентування, баластування, посадки судна тощо. Проте для існуючих і старих суден проблема залишається невирішеною і недостатньо опрацьованою, деякі аспекти якої лежать на поверхні.

Зниження швидкості, безумовно є важливим способом зниження витрат палива; однак це збільшує час рейсу судна і негативно впливає на показники комерційної експлуатації судна та ефективність експлуатації енергетичної установки, що призводить до значних витрат палива на одиницю відстані. Більш того, рівень

енергоефективності суднової енергетичної установки залежить не тільки від робочого стану головного двигуна і стану вантажу, але і від зміни навігаційної обстановки. Комплекс технологічних рішень щодо підвищення рівня енергоефективності суден подано на рис. 4.

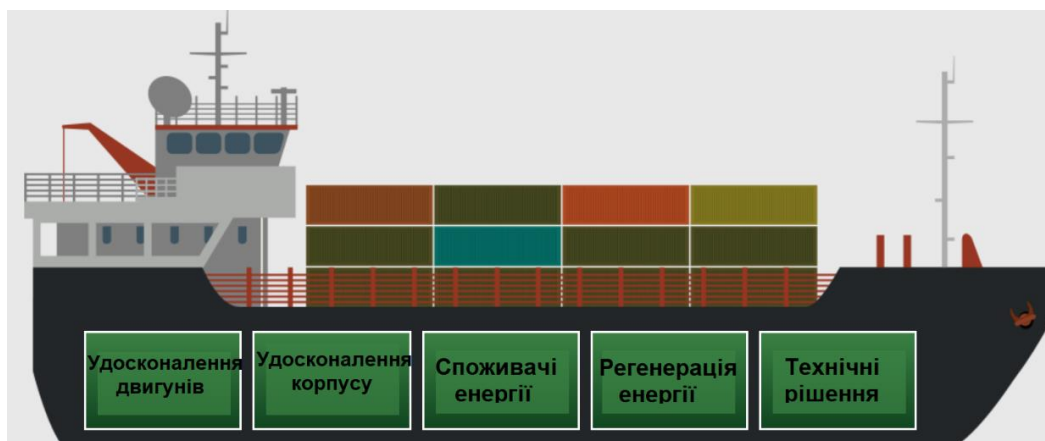


Рис. 4. Технології щодо підвищення рівня енергоефективності суден

Конструкція судна відіграє важливу роль у забезпеченні енергоефективності судна, оскільки вона є основою експлуатаційної ефективності. Технічні заходи щодо зниження витрат палива включають використання високоефективних суднових двигунів і силових установок, оптимізовані обводи корпусу, геометрію керма і гребного гвинта, а також такі інновації, як бульбоподібна носова частина. Додатковим потенціалом

економії палива є рекуперація тепла та використання ЗПГ (зрідженого природного газу), що є найкращим паливом, коли мова йде про заміну традиційних видів палива в суднопластві, оскільки воно має порівняно меншу кількість викидів сірки і оксидів азоту. Однак великі площі, необхідні для зберігання ЗПГ, на сьогодні стримують його широке використання. Принципи функціонування плану управління енергоефективністю судна подано на рис. 5.



Рис. 5. Принципи функціонування плану управління енергоефективністю судна

Успішне і стійке зниження кількості споживання палива, використовуваного на судах, і загальне підвищення експлуатаційної ефективності може бути досягнуто шляхом упровадження різних експлуатаційних методів. До них належить планування операцій на низьких швидкостях, більш ефективне використання потужностей і ресурсів, а також безперервний зв'язок між судноплавними організаціями для ефективного планування маршрутів. Скорочення часу обороту в портах – ще один спосіб підвищення ефективності роботи суден. Дослідження [18] показало, що двома найбільшими джерелами непродуктивного часу в порту є час очікування причалу, коли порт закритий, і час очікування причалу через дострокове прибуття. При скороченні часу від однієї до чотирьох годин на один захід у порт потенціал підвищення енергоефективності становить 2–8 %.

**Висновки.** Підсумовуючи сказане, слід зазначити, що енергетична ефективність морського транспорту в цілому є більш високою порівняно з іншими видами транспорту, тому послідовно зростатимуть стимули та правила для підвищення енергоефективності суден. Проведений аналіз основних інструментів управління енергоефективністю судна демонструє реалізацію дієвих шляхів щодо економії енергії на борту суден за рахунок комплексної оцінки та прогнозування ефективності і зменшення вуглецевого сліду в екології. Нормативні

вимоги щодо управління енергоефективністю підвищують галузеві стандарти для об'єктів морського транспорту, отже, вдосконалення заходів, спрямованих на підвищення енергоефективності морських суден насамперед через зниження обсягів викидів вуглекислого газу в атмосферу, стоїть серед першочергових завдань. Окреме місце належить вартості впровадження нових і більш ефективних технологій щодо модернізації існуючих суден з метою поліпшення їхніх екологічних і економічних показників, тому перелічені заходи потребують розроблення більш досконалих і суттєвих засобів і методів забезпечення енергоефективності.

Розроблення оперативних заходів щодо підвищення експлуатаційної ефективності судна, безумовно, – вкрай актуальне завдання, що потребує додаткових досліджень та впровадження новітніх технологій, однією з яких може бути використання інтегрованих систем підтримки прийняття рішень, що спрямовані на скорочення як витрат палива, так і викидів шкідливих речовин. Станом на сьогодні вже розроблений та успішно втілюється комплекс технологій щодо підвищення енергоефективності суден, де основна увага приділяється конструкції корпусу судна, регенерації електроенергії, якості палива і рівню його споживання, а також експлуатаційним заходам на судні, але ці засоби і методи експлуатації все ще

потребують вдосконалення з урахуванням особливостей кожного з напрямів, щоб

досягти максимального рівня ефективності експлуатації існуючих і майбутніх суден.

### Список використаних джерел

1. Хасанов И. И., Гимаева А. Р. Особенности бункеровки топлива для судов на сжиженном природном газе. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2017. № 3. С. 19–22.
2. Карпенко А. А., Копцева Е. П. Перспективы перевода судов морского и речного транспорта на альтернативные виды топлива. *Транспортное дело*. 2017. № 3. С. 63–66.
3. Безюков О. К., Жуков В. А., Ященко О. И. Газомоторное топливо на водном транспорте. *Вестник ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова*. 2014. № 6 (28). С. 31–39.
4. Управляем энергоэффективностью. Морской транспорт. URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1692/23595/>.
5. Energy Efficiency Measures. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>.
6. Hüffmeier J., Johanson M. State-of-the-Art Methods to Improve Energy Efficiency of Ships. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021. 9. 447. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9040447>.
7. Capt Rajeev Jassal (2018) Ship Energy Efficiency: Here is All You Need to Know [Електроний ресурс] Вилучено з: <https://www.myseatetime.com/blog/detail/ship-energy-efficiency>.
8. Energy efficiency in shipping - why it matters! (2018) Maritime Cyprus. URL: <https://maritimecyprus.com/2018/04/03/energy-efficiency-in-shipping-why-it-matters>.
9. IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation. Module 2 – Ship Energy Efficiency. Regulations and Related Guidelines. London, 2016, 45 p.
10. MEPC.1/Circ.684, “Guidelines for voluntary use of the ship EEOI”, MEPC.1/Circ.684, 17 August 2009.
11. MEPC.1/Circ.815: 2013 Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI for ships in adverse conditions.
12. Yupeng Yuan, Zhixiong Li, Reza Malekian & Xinpeng Yan (2017) Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts, *Journal of Marine Engineering & Technology*. 16:3. 150-159. DOI: 10.1080/20464177.2017.1307716.
13. Energy efficiency technologies information portal. URL: <https://glomeep.imo.org/resources/energy-efficiency-technologies-information-portal/#:~:text=These%20include%20measures%20such%20as,hydrodynamic%20performance%20of%20the%20vessel>.
14. Shivam Sargam (2019) Ship energy efficiency. URL: <http://themarineexpress.com/ship-energy-efficiency/>.
15. Onyshchenko S., Shibaev O. and Melnyk, O. (2021) “Assessment of Potential Negative Impact of the System of Factors on the Ship’s Operational Condition During Transportation of Oversized and Heavy Cargoes”, *Transactions on Maritime Science*. Split, Croatia, 10(1). DOI: 10.7225/toms.v10.n01.009.
16. Melnyk O., Malaksiano M. Effectiveness assessment of non-specialized vessel acquisition and operation project, considering their suitability for oversized cargo transportation. *Transactions on Maritime Science*. 2020. №1(9). P. 23–34.
17. Мельник О. М., Онищенко С. П. Modelling of changes in ship’s operational condition during transportation of oversized and heavy cargo (Модельовання зміни експлуатаційного стану судна в процесі транспортування негабаритних і великовагових вантажів. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 6/2(56). С. 66–70.



18. Johnson, Hannes and Linda Styhre. "Increased energy efficiency in short sea shipping through decreased time in port." *Transportation Research Part A-policy and Practice* 71 (2015): 167-178.

---

Мельник Олексій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету. Тел.: (048) 732-06-38. E-mail: m.onmu@ukr.net. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Онищенко Світлана Петрівна, доктор екон. наук, професор, директор Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету. Тел.: (048) 728-31-28. E-mail: onyshchenko@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7528-4939.

Волошин Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету. Тел.: (048) 732-06-38. E-mail: aavoloshin61@gmail.com. ORCID: 0000-0003-3993-5826.

Калініченко Євген Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри навігації і керування судном Одеського національного морського університету. Тел.: (048) 732-06-38. E-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com. ORCID: 0000-0003-2898-7313.

Заяц Сергій Валентинович, старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету. Тел.: (048) 732-06-38. E-mail: s.v.zaiats@gmail.com.

Oleksiy Mykolayovych Melnyk, PhD (Tech.), Associate Professor of Seamanship and Maritime Safety Department, Odessa National Maritime University. Tel: (048) 732-06-38. E-mail: m.onmu@ukr.net. ORCID: 0000-0001-9228-8459. Onishchenko Svitlana Petrivna, D. Sc. (Econ.), Professor, Director of the Scientific and Educational Institute of Maritime Business, Odessa National Maritime University. Tel: (048) 728-31-28. E-mail: onyshchenko@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7528-4939.

Voloshin Andriy Oleksandrovysh, PhD (Tech.), Professor, Head of Seamanship and Maritime Safety Department, Odessa National Maritime University. Tel: (048) 732-06-38. E-mail: aavoloshin61@gmail.com. ORCID: 0000-0003-3993-5826.

Kalinichenko Yevgen Volodymyrovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Navigation and Ship Control of the Odessa National Maritime University. Tel: (048) 732-06-38.

E-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com. ORCID: 0000-0003-2898-7313.

Zayats Sergey Valentinovich, Senior Lecturer of Seamanship and Maritime Safety Department of Odessa National Maritime University. Tel: (048) 732-06-38. E-mail: s.v.zaiats@gmail.com.

Статтю прийнято 07.09.2021 р.

**УДК 656.222**

## **ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ВАРІАНТА РОЗВИТКУ ЛІНІЇ ШВИДКІСНОГО РУХУ ВІДПОВІДНО ДО ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКОНОМІЧНИХ КРИТЕРІЇВ**

**Канд. техн. наук А. Л. Кравець, магістранти А. В. Чернолуцький, С. В. Серпокрялов**

## **JUSTIFICATION OF A RATIONAL OPTION OF DEVELOPMENT OF THE HIGH-SPEED RAILWAY ACCORDING TO TECHNICAL, TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC CRITERIA**

**PhD (Tech.) A. Kravets, masters A. Chernolutskyi, S. Serpokrylov**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248321>

---

**Анотація.** Запропоновано методичку обґрунтування раціонального варіанта розвитку лінії при організації швидкісного та високошвидкісного руху на основі техніко-технологічних та економічних критеріїв. Завдання визначення раціонального варіанта розвитку лінії для швидкісного (високошвидкісного) руху пропонується вирішувати як завдання оптимального розподілу ресурсів за елементами лінії з урахуванням техніко-технологічних та економічних критеріїв. Залежно від цілей розрахунку, завдання пропонується розглядати у прямій та зворотній постановці.

Отримані результати можуть бути використані при обґрунтуванні рішень щодо застосування одноколіїних елементів та визначення раціональної конфігурації одноколіїно-двоколіїних ліній при організації швидкісного руху.

**Ключові слова:** високошвидкісний рух, пасажирські перевезення, одно-, двоколіїна лінія, час ходу поїзда, капіталовкладення в інфраструктуру.

**Abstract.** When a new high-speed railway is designed on the routes with the existing mixed (freight and passenger) traffic, part of the trains can be relocated from the existing railway to the new one. This will have an additional effect of the increasing current capacity of the existing railway.

A method is proposed for justification of a rational option for the development of a high-speed rail on the basis of technical, technological and economic criteria. It is proposed to solve the problem of determining the rational option for the development of a high-speed railway as the problem of optimal distribution of resources among the components of the railway, taking into account technical, technological and economic criteria. The result is a set of solutions consisting of options for the development of each component of the railway, which will provide the maximum systemic effect for the railway as a whole. Each  $j^{\text{th}}$  option of the development of the  $i^{\text{th}}$  component of a high-speed railway can be described by three main indicators: the travel time of a high-speed train; capital investments required to implement this option; and the available traffic capacity of the component. Depending on the problem being solved, each of the listed parameters can act both as a criterion and as a limitation.

Depending on the purposes of the design, it is proposed to consider the problem of determining the rational option for the railway development either in the direct or inverse setting. In the first case, the systemic effect is expressed by an objective function that minimizes the amount of necessary capital investments in the railway infrastructure while ensuring the stipulated travel time of a high-speed train. In the second case, the purpose is to minimize the travel time of the train without exceeding the specified amount of capital investment in the development of all components of the railway.

The results obtained can be used to justify decisions on the use of single-track components and to determine the rational configuration of single-track lines when high-speed traffic is organized.

**Keywords:** high-speed traffic, passenger transport, single/double tracked line, time of travel, capital investment in infrastructure.

**Вступ.** Розвиток мережі залізниць в Україні раніше не передбачав створення ліній, спеціалізованих для швидкісного (високошвидкісного) руху. За потреби організації такого руху проводилася реконструкція існуючих ліній під більші швидкості. Проте можливості збільшення швидкості обмежувались обсягом та вартістю робіт з необхідної реконструкції. Також обмеженням є характер

експлуатаційної роботи існуючої лінії, розміри вантажного та пасажирського руху.

Однак завдання пошуку шляхів мінімізації необхідних капіталовкладень у створення ліній швидкісного та високошвидкісного руху є важливим. Існуючі залізничні лінії проектувалися переважно для умов вантажного руху, тому реконструкція не завжди може забезпечити підвищення швидкості та забезпечення

необхідного скорочення часу ходу швидкісних поїздів. Додаткові складності створює організація швидкісного руху на існуючих лініях з високою пропускнуною спроможністю.

У зв'язку з цим можна розглядати варіант проектування нових ліній для швидкісного (високошвидкісного) руху на перспективних напрямках, зокрема у вигляді паралельних ходів, основним завданням яких буде забезпечення заданого мінімального часу перебування поїзда в русі. Однак питання доцільності спорудження таких ліній потребує окремих досліджень, які враховують наявність попиту на послугу такого швидкісного перевезення за певного рівня тарифів, який залежатиме від капітальних витрат на спорудження лінії.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз зарубіжних робіт у галузі дослідження показав, що пропозицію використання для швидкісного і високошвидкісного руху одноколіїних ліній вперше було надано в Канаді в 1987 р. вченими E. R. Petersen, A. J. Taylor з Queen's University (Kingston, Ontario) [1]. У рамках цієї пропозиції вирішувалися завдання щодо визначення раціонального розташування одноколіїних ліній для пропуску швидкісних поїздів на територіях з низькою щільністю населення.

У 2010 р. вчені Andreas Dyrpvik Landmark, Nils O. E. Olsson і Andreas Amdahl Seim з Норвезького університету науки і технологій (Norwegian University of Science and Technology) [2] при вирішенні завдань оптимізації графіка руху швидкісних поїздів займалися вивченням впливу окремих елементів інфраструктури (насамперед одноколіїних елементів) на збільшення часу пропуску поїздопотоків. Полігоном для таких досліджень послужила норвезька мережа залізниць, яка здебільшого складається з одноколіїних ліній.

Вплив одноколіїних ліній на втрату часу руху поїздів у 2010 р. також розглядав Rob M. P. Goverd з Department of Transport

and Planning, Delft University of Technology [3, 4], на полігоні шведської залізниці, яка також містить велику кількість одноколіїних ділянок. Було розроблено алгоритм оцінки затримок з урахуванням графіка руху поїздів.

У 2014 р. іспанські вчені E. Castillo, M. Nogal і Z. Grande з університету Кастілла – Ла Манча (Universidad de Castilla – La Mancha) [5, 6] розглядали питання, пов'язані зі скороченням витрат на організацію високошвидкісного руху на другорядних напрямках за рахунок використання так званих Double-Single track (ADST) (одноколіїно-двоколіїних ліній). Ідея полягала в тому, щоб по можливості використовувати одноколіїні ділянки, що містять дорогу інфраструктуру (тунелі, естакади). Вчені дійшли висновку, що використання одноколіїно-двоколіїних ліній замість повністю двоколіїних при організації високошвидкісного руху може привести до скорочення капітальних витрат до 40 %.

Таким чином, пропозиції щодо використання для одноколіїних та одноколіїно-двоколіїних ліній для швидкісного та високошвидкісного руху з'явилися за кордоном наприкінці 80-х років ХХ століття і набули розвитку в 2010–2015 рр. При цьому вирішувалися питання обґрунтування розміщення таких ліній на мережі залізниць, а також питання розробки оптимального графіка руху по них швидкісних поїздів на основі перегінних часів ходу, що розраховуються.

В Україні проблемою підвищення швидкостей руху поїздів почали займатися у 60–70-х роках минулого століття. У 80-ті роки були спроби встановлення швидкостей руху пасажирських поїздів у напрямку Москва – Харків – Крим до 160 км/год (з експериментальними поїздками до 180 км/год). Однак після розпаду СРСР на залізничному транспорті України більше десятиліття не розглядалася можливість запровадження швидкісного руху поїздів. Тільки у 2003 р. було відкрито регулярний

рух пасажирських поїздів зі швидкостями до 140 км/год [7].

**Визначення мети і постановка завдання дослідження.** Метою дослідження є вирішення завдання визначення раціонального варіанта розвитку лінії для швидкісного (високошвидкісного) руху.

При розробці проектів організації швидкісного та високошвидкісного руху, особливо при спорудженні нових ліній, важливе значення має обґрунтування раціональних конструктивних та технологічних рішень з погляду можливості скорочення необхідного обсягу капіталовкладень. Витрати на проектування ліній залежать переважно від обраної концепції розвитку.

Як перший чинник, що впливає на величину капітальних витрат на реалізацію проектів, пов'язаних з підвищенням швидкості руху поїздів, є компонування лінії. Пропонується розглянути можливість використання для швидкісного та високошвидкісного руху одноколієних та одноколієно-двоколієних ліній.

Основним варіантом при цьому є одноколієна лінія. Потребу у двоколієних елементах (перегонах, двоколієних вставках) необхідно визначати з урахуванням оцінки рівня пропускної спроможності одноколієних елементів, можливих затримок у пропуску поїздів, у т. ч. швидкісних (високошвидкісних).

Таким чином, за потреби організації або розширення використання швидкісного (високошвидкісного) руху на новій або існуючій лінії необхідно мати інструмент для відбору найбільш раціональних рішень щодо її розвитку. Розглядаючи лінію у вигляді багатьох елементів, необхідно визначити раціональний варіант розвитку кожного з них за умови досягнення

максимального системного ефекту для лінії в цілому.

**Основна частина дослідження.** Кількість можливих варіантів проектних рішень щодо кожного елемента лінії та його характеристики залежать від місцевих умов, потреб і технічних можливостей розвитку об'єкта та інших чинників. Наприклад, окремий перегін може бути одноколієним на всьому протязі, одноколієним з двоколієною вставкою, двоколієним, мати різні обмеження швидкості, протяжність.

Багато можливих варіантів може бути подано у вигляді матриці, з якої і відбираються найбільш раціональні варіанти розвитку лінії [8]. Кожен  $j$ -й варіант розвитку  $i$ -го елемента залізничної лінії для швидкісного (високошвидкісного) руху можна описати за допомогою трьох основних техніко-технологічних та економічних критеріїв:

- часу ходу швидкісного поїзда  $T_{ij}$ ;
- капітальних вкладень  $K_{ij}$ , необхідних для реалізації даного варіанта;
- наявної пропускної спроможності елемента  $N_{ij}$ .

Залежно від завдання, що вирішується, кожен із зазначених параметрів може виступати як критерієм, так і обмеженням. Основними критеріями пропонується вважати  $K$  і  $T$ . Пропускна спроможність при цьому розглядатиметься як обмеження для відбору варіантів проектних рішень за кожним елементом.

Обсяг необхідних капіталовкладень  $K_{ij}$  при обґрунтованих конструктивних та технологічних параметрах елемента може бути визначений кошторисним розрахунком [9].

При використанні як критерію сумарного обсягу капітальних вкладень буде застосовано мінімізуючу цільову функцію

$$S = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} K_{ij} \rightarrow \min, \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} T_{ij} = T_x = \text{const}, \quad (1)$$

$$N_{ij} > N_n K_3, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n_i},$$

де  $K_3$  – допустимий коефіцієнт заповнення пропускної спроможності;

$m$  – кількість елементів лінії;

$n_i$  – кількість варіантів розвитку  $i$ -го елемента.

При використанні критерію часу ходу швидкісного поїзда можлива як мінімізуюча функція, так і функція, що прагне до заданого значення перебування швидкісного поїзда на шляху,

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} T_{ij} \rightarrow \begin{cases} \min \\ const' \end{cases}, \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} K_{ij} = K = const, \quad (2)$$

$$N_{ij} > N_n K_3, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n_i},$$

При визначенні варіанта розвитку лінії рішення, спрямовані на скорочення часу перебування в русі швидкісного поїзда або скорочення обсягу інвестицій, можна розглядати як зовнішні по відношенню до проекту: визначення раціональної конфігурації лінії при заздалегідь обмеженому обсязі інвестицій  $K$  або при заданому допустимому часі  $T$  проходження швидкісного поїзда лінії. В останньому випадку бажаний час  $T$ , який необхідно забезпечити під час руху швидкісних поїздів по лінії, може бути визначений на основі маркетингових та соціально-економічних досліджень затребуваності послуги швидкісного перевезення.

Час перебування швидкісного поїзда в русі є функцією швидкості. Мінімальний час забезпечується за відсутності технологічно обумовлених затримок пропуску поїздопотоків, а також реалізованої максимальної швидкості руху  $V^{\max}$ , що відповідає конструктивним можливостям використовуюваного рухомого складу. Однак при розвитку всіх елементів залізничної лінії під однаковий заданий рівень максимальної швидкості руху

$V_i^{\max} = V^{\max}$ ,  $i = \overline{1, m}$  за низкою елементів можуть бути значні додаткові витрати, пов'язані з місцевими умовами. Це

стосується дорогих штучних споруд, перегонів із складними умовами будівництва тощо. При цьому сумарний час перебування швидкісного поїзда в русі залежить не тільки від максимальної швидкості, що реалізується по кожному елементу. Прагнення максимальної швидкості руху на всій протяжності лінії можна вважати виправданим для ліній, спеціалізованих під високошвидкісний рух, за високої інтенсивності руху поїздів, коли критеріями є швидкість руху і пропускна спроможність. В інших умовах використання такого принципу розвитку лінії може призвести до необґрунтованого збільшення капітальних витрат.

Таким чином, залежно від цілей розрахунку, завдання визначення раціонального варіанта розвитку лінії пропонується розглядати у прямій та зворотній постановці. У першому випадку системний ефект виражається цільовою функцією, що мінімізує обсяг необхідних капіталовкладень в інфраструктуру лінії при забезпеченні заданого часу перебування швидкісного (високошвидкісного) поїзда в русі. У другому випадку метою є мінімізація витрат часу поїзда на шляху за умови неперевищення заданого обсягу капіталовкладень у розвиток усіх елементів лінії. Інтерпретацію задачі, обмеження та

рекурентні рівняння, що застосовуються, подано у таблиці.

Альтернативним рішенням може бути забезпечення техніко-технологічного та економічно обґрунтованого (різного) рівня максимальної швидкості по кожному елементу лінії за умови виконання необхідного сумарного часу ходу ділянкою. Частина елементів лінії може і не забезпечувати максимальної швидкості руху, якщо за рахунок раціонального розподілу часу ходу по ділянці загалом втрати часу на таких елементах компенсуються вищою швидкістю руху на інших елементах. Таким чином, задачу раціонального розвитку лінії під швидкісний рух можна вважати вирішеною, якщо буде забезпечено заданий

сумарний час руху швидкісного поїзда ділянкою, за умови не перевищення заданого обсягу капіталовкладень.

**Висновок.** Завдання визначення раціонального варіанта розвитку лінії для швидкісного (високошвидкісного) руху пропонується вирішувати як завдання оптимального розподілу ресурсів за елементами лінії з урахуванням техніко-технологічних та економічних критеріїв: часу ходу швидкісного поїзда, наявної пропускної спроможності, обсягу капіталовкладень. Результат є безліч рішень, що складається з варіантів розвитку кожного елемента лінії, які забезпечать максимальний системний ефект для лінії в цілому.

Таблиця 1

Інтерпретація, обмеження та рекурентні рівняння, що застосовуються в задачі оптимального розподілу ресурсів

Задача в прямій постановці	Задача у зворотній постановці
<b>1. Інтерпретація задачі</b>	
1.1. $T_x$ – загальний запас ресурсів (час ходу швидкісного поїзда по залізниці); 1.2. $T_{ij}$ – обсяг ресурсів, що виділяється на об’єкт (час ходу швидкісного поїзда по $i$ -му елементу); 1.3. $g_i(T_{ij})$ – «ефект» (витрати) на $i$ -му об’єкті при виділенні йому $T_{ij}$ ресурсів	1.1. $K$ – загальний запас ресурсів (сумарний обсяг капіталовкладень, що розподіляється); 1.2. $K_{ij}$ – обсяг ресурсів, що виділяється на об’єкт (витрати на розвиток $i$ -го елемента лінії); 1.3. $g_i(K_{ij})$ – «ефект» (мінімально можливий час ходу швидкісного поїзда) на $i$ -му об’єкті при виділенні йому $K_{ij}$ ресурсів
1.4. $m$ – кількість об’єктів, за якими виконується розподіл (кількість елементів на залізничній лінії, що розглядається)	
<b>2. Обмеження</b>	
2.1. $\sum_{i=1}^m T_{ij} \leq T_x$	2.1. $\sum_{i=1}^m K_{ij} \leq K$
2.2. $N_{ij} > N_n K_3, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n_i},$ де $N_{ij}$ – наявна пропускна спроможність $i$ -го елемента; $K_3$ – коефіцієнт заповнення пропускної спроможності; $N_n$ – необхідний рівень пропускної спроможності лінії	
<b>3. Рекурентні рівняння</b>	

$$\left\{ \begin{array}{l} Z = f_m(T_x) = \min [f_{m-1}(T_x - T_{xm-1}) + g_m(T_{xm})], \quad T_{xm} = \overline{0, T_x}, \\ f_{m-1}(T_x) = \min [f_{m-2}(T_x - T_{xm-1}) + g_{m-1}(T_{xm-1})], \quad T_{xm-1} = \overline{0, T_x}, \\ f_{m-2}(T_x) = \min [f_{m-3}(T_x - T_{xm-2}) + g_{m-2}(T_{xm-2})], \quad T_{xm-2} = \overline{0, T_x}, \\ \dots\dots\dots, \\ f_2(T_x) = \min [f_1(T_x - T_{x2}) + g_2(T_{x2})], \quad T_{x2} = \overline{0, T_x}, \\ f_1(T_x) = \min [f_0(T_x - T_{x1}) + g_1(T_{x1})], \quad T_{x1} = \overline{0, T_x}, \\ f_0(T_x - T_{x1}) = 0, \quad f_1(T_x) = g_1(T_{x1}). \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Z = f_m(K) = \min [f_{m-1}(K - K_{m-1}) + g_m(K_m)], \quad K_m = \overline{0, K}, \\ f_{m-1}(K) = \min [f_{m-2}(K - K_{m-1}) + g_{m-1}(K_{m-1})], \quad K_{m-1} = \overline{0, K}, \\ f_{m-2}(K) = \min [f_{m-3}(K - K_{m-2}) + g_{m-2}(K_{m-2})], \quad K_{m-2} = \overline{0, K}, \\ \dots\dots\dots, \\ f_2(K) = \min [f_1(K - K_2) + g_2(K_2)], \quad K_2 = \overline{0, K}, \\ f_1(K) = \min [f_0(K - K_1) + g_1(K_1)], \quad K_1 = \overline{0, K}, \\ f_0(K - K_1) = 0, \quad f_1(K) = g_1(K_1). \end{array} \right.$$

Список використаних джерел

1. Petersen E. R. and Taylor A. J. Design of single-track rail line for high-speed trains / *Transportation Research. Part A: General*, 21(1), 1987. P. 47–57.
2. Andersen S. Проблематика смешанных пассажирских и грузовых перевозок при большой разнице скоростей движения: пер. с нем. *Eisenbahntechnische Rundschau*. 1999. №№ 1–3. С. 15–16, 23–26, 28–29.
3. Goverde R. M. A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research. Part C: Emerg. Technol.* 2010. 18(3). P. 269–287.
4. Goverde R. M. and Hansen I. A. Delay propagation and process management at railway stations. 5th World Conference on Railway Research (Köln, November 25–29, 2001).
5. Castillo E., Nogal M. and Grande Z. An Alternate Double-Single Track Proposal for High-Speed Peripheral Railway Lines. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015. 30. P. 181–201.
6. Castillo E., Gallego I., Urena J. and Coronado J. Timetabling optimization of a mixed double- and singletracked railway network. *Applied Mathematical Modelling*. 2011. 35. P. 859–878.
7. Пшинько А., Курган Н., Патласов А. Основные направления развития транспортной инфраструктуры при внедрении скоростного движения на железных дорогах Украины. *Transport Bridge Europe-Asia: Proceedings of the V Georgian-Polish International Scientific-Technical Conference, October 15-17, 2019 / Akaki Tsereteli State University [et al.]. Kutaisi, Georgia, 2019. P. 85–90.*
8. Andreas Dypvik Landmark and Nils O.E. Olsson Amdahl Seim Method of analysis for delay propagation in a single-track network. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2017. 7. P. 77–97.
9. Курган М. Б., Курган Д. М. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні: монографія. Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2016. С. 269–284.

Кравець Анна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0003-1165-1960. Тел.: +38 (098) 2100423. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Чернолуцький Аркадій Валерійович, магістр кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (073) 0661838. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Серпокрилов Святослав Віталійович, магістр кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 0257315. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Kravets Anna Leonidovna, PhD (Tech.), associate professor of department of management of freight and commercial work, Ukraine state university of railway transport. Tel.: ORCID ID: 0000-0003-1165-1960. Тел.: +38 (098) 2100423. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Chernolutskyi Arkadii Valerievich, master of department of management of freight and commercial work, Ukraine state university of railway transport. Тел.: +38 (073) 0661838. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Serpokrylov Svyatoslav Vitalievich, master of department of management of freight and commercial work, Ukraine state university of railway transport. Тел.: +38 (066) 0257315. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 14.09.2021 р.



**ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)**

---

УДК 658.264

**ОЦІНКА ТЕПЛООВОГО СТАНУ МІКРОРАЙОННОЇ МЕРЕЖІ ОПАЛЕННЯ**

Канд. техн. наук О. О. Алексахін, магістранти І. С. Дубинська, І. С. Соляник,  
Ж. М. Домбровська

**THE COMMUNITY HEATING NETWORK'S THERMAL CONDITION ASSESSMENT**

PhD (Tech.) A. A. Aleksahin, master I. S. Dubinskaya, master I. S. Solyanik,  
master Zh. M. Dombrovs'ka

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248328>

---

*Анотація.* Для житлового мікрорайону м. Харкова визначено втрати теплоти розподільними трубопроводами мережі опалення. Обчислення теплових втрат проведено для умов прокладки трубопроводів у непрохідних каналах. Температуру мережної води прийнято за температурним графіком теплової мережі відповідно до розрахункової для опалення температури зовнішнього повітря. Питомі втрати теплоти трубопроводами на ділянках мережі прийнято на рівні нормативних значень для вказаного способу прокладки. Втрати теплоти конструктивними елементами мереж враховано коефіцієнтом 1,15. Обчислення проведено з урахуванням зміни витрат і температури мережної води на розрахункових ділянках. Витрати мережної води на ділянках мережі визначено за проєктними тепловими навантаженнями приєднаних будівель.

*Ключові слова:* централізована система опалення мікрорайону, розподільні теплові мережі, втрати теплоти трубопроводами, енергозбереження.

*Abstract.* Heat losses at the heating network's distribution pipelines were identified for Karkiv community. Heat losses' calculation is performed in view of the underground pipelines' installation in non-accessible ducts. The heating system water temperature is accepted in line with the heating network temperature chart and according to the design outdoor temperature value for heating purposes. Specific heat losses in the network section' pipelines are accepted at the level of standard values for the specified network laying method. The water flow rate at the heat pipeline sections is defined as per the design heat loads from the buildings connected to the heat supply network. The heat pipeline segment with uniform diameter is accepted as the rated section. The soil temperature at the heat pipeline axis laying depth is accepted as 5°C. The heat losses at the structural network elements are considered by 1.15 coefficient. The calculations are performed in view of the heating system water flow rate and temperate changes along the heat pipeline length. While analyzing the thermal condition of the return pipelines of the community heating network, the changes in the heat content of the heating system water flow in the main direction pipeline during mixing with the water flow from the branches of the main direction line are taken into account. Considering the average temperature of the coldest five days consecutively, the total energy loss in heating pipeline for a group of buildings in Kharkov region are equivalent to 180.8kW.

*In view of the ambient air temperature changing over the heating period for Kharkiv city climate conditions and the current schedule for quality heat energy supply to the consumers control the annual heat losses in the community heating network pipelines were calculated. The soil*

*temperature change at the heat pipeline installation depth during the heating period was not considered.*

*Heat losses in the microdistrict network for the year are 2184 GJ. The data obtained can be used to compare options when developing a strategy for reforming the microdistrict heat supply system.*

**Keywords:** *district heating, community heating system, distributing heat networks, heat losses in the pipelines, law of heat carrier medium flow rate changes along the heat pipelines' length, energy audit.*

**Вступ.** За роки розвитку централізованого теплопостачання інженерна інфраструктура мікрорайону стала одним з підрозділів складної, розгалуженої системи. Практика експлуатації систем теплопостачання показує, що крупні розгалужені системи не можна надійно експлуатувати без створення проміжних ступенів управління між джерелами теплоти і абонентами. Такими ступенями управління є групові теплові підстанції, на яких відбувається приготування води для потреб гарячого водопостачання, розподіл теплоносія за видами навантажень, регулювання гідравлічних і теплових режимів у мікрорайонних теплових мережах, облік споживання теплоти. Розвиток централізованого гарячого водопостачання обумовив створення потужних підігрівних установок для забезпечення споживачів гарячою водою, а також той факт, що мікрорайонні теплові мережі, як правило, чотиритрубні: подавальний і зворотний трубопроводи системи опалення та подавальний і циркуляційний трубопроводи системи гарячого водопостачання.

При розробці проєктів теплових мереж житлової групи необхідно враховувати велику кількість факторів: геологічні і містобудівні умови, показники забудови, наявність і ресурс джерел теплової енергії і магістральних мереж від них тощо. Важливим техніко-економічним показником варіанта виконання мікрорайонної теплової мережі є втрати теплоти, які, згідно з нормативними матеріалами, не мають перевищувати 13 % від відпущеної до мереж теплоти [1]. Зменшення теплових втрат у розподільних мережах обумовлює

підвищення ефективності теплопостачання в цілому. Порівняння варіантів виконання системи теплопостачання забудови групи при її реформуванні передбачає аналіз великої кількості факторів. У тому числі і ступінь зменшення втрат теплоти для запропонованих варіантів у порівнянні з існуючою схемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За минулі роки в містобудуванні склалась певна планувальна структура [2–4]. У крупних і найкрупніших містах вона передбачає створення районів, кожен з яких складається з декількох мікрорайонів. У середніх і малих містах основною одиницею забудови є квартал. Розвиток інженерної інфраструктури міст відбувався відповідно до розвитку містобудування. Результатом становлення системи забезпечення тепловою енергією будівель і споруд у великих і середніх містах є система централізованого теплопостачання з наявністю різнорідних джерел теплоти різної потужності і розгалуженими тепловими мережами значної довжини. Основним джерелом теплоти у великих містах є теплоелектроцентралі, на яких реалізується комбіноване вироблення теплової і електричної енергії. Теплофікація забезпечує 40 % теплоти, що споживається у промисловості і комунальному господарстві для потреб опалення і гарячого водопостачання [5, 6]. Використання теплофікаційних схем обумовлює наявність теплових мереж, які з'єднують джерело теплової енергії і системи теплоспоживання.

Відповідно до структури містобудівельних утворень інженерні мережі розподіляють на мікрорайонні, що

обслуговують забудову у межах мікрорайону, магістральні районного значення і магістральні загальноміського значення для забезпечення міста в цілому. Для магістральних теплопроводів характерні більш високі параметри теплоносія, ніж це необхідно для систем приєднаних будівель. Необхідність зниження температури води у подавальних трубопроводах теплових мереж від магістральних до розподільних мереж обумовила необхідність спорудження спеціальних теплових пунктів. Особливістю сформованих систем централізованого теплопостачання є велика довжина мікрорайонних теплових мереж. Наприклад, довжина магістральних теплових мереж у м. Харкові становить 403 км (у двотрубному обрахуванні), а розподільних мереж – 1120 км. Діаметри теплових магістралей знаходяться у діапазоні від 600 до 1200 мм, середній діаметр мікрорайонних мереж знаходиться у межах 130 мм [7]. Основний метод прокладки теплопроводів у м. Харкові – роздільний, підземний, у непрохідних каналах; основний вид теплоізоляції – мінераловатна ізоляція. На поточний час приблизно 40 % магістральних теплових мереж перебувають в експлуатації більше 30 років і, як свідчить аналіз стану інженерних мереж м. Харкова [8], значна їх частина має незадовільні експлуатаційні показники. Середній відсоток зносу теплових мереж складає більше 60 %, що веде до наднормативних втрат теплової енергії при транспортуванні. Зменшення теплових втрат можна досягти застосуванням сучасних ізоляційних матеріалів і технологій при спорудженні і реконструкції теплових мереж, оптимізацією проектних рішень з трасування мереж, дотриманням умов експлуатації теплопроводів.

Одним з етапів оптимізації проекту виконання теплових мереж є тепловий розрахунок. Для обчислення теплових втрат теплопроводами існують надійні, апробовані методики [9], недоліком яких є

доволі великий обсяг необхідної вихідної інформації і спрощені методики обчислень за укрупненими показниками забудови, наприклад [10]. Хоча похибку обчислень за спрощеними методиками слід очікувати дещо вищою, ніж у першому випадку, їх застосування можливе на початкових стадіях проектування.

Більшість будівель, що сформували житлову забудову в Україні, введено в експлуатацію у період дії нормативів до термічного опору зовнішніх огорожень, які були суттєво менше європейських [11, 12] і сучасних вітчизняних вимог [13]. Тому підвищення термічного опору будівельних конструкцій, як і зменшення втрат теплоти у теплових мережах, є основними напрямками енергозбереження у будівельній сфері і комунальній теплоенергетиці.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Визначення втрат теплоти теплопроводами системи опалення 522 мікрорайону Салтівського житлового масиву у м. Харкові.

Для досягнення сформульованої мети потрібно розв'язати такі завдання:

- для реалізованого у розглянутій групі будівель способу прокладки теплових мереж обчислити розподіл витрат та зміну температури мережної води по довжині теплопроводу;

- з урахуванням охолодження теплоносія на ділянках теплової мережі обчислити втрати теплоти подавальними і зворотними трубопроводами мікрорайонної системи опалення.

**Основна частина дослідження.** Розрахункова схема теплопроводів розглянутого фрагменту мікрорайонної мережі наведена на рисунку. Основні показники теплових мереж подано у табл. 1. Значення діаметрів і довжин ділянок прийнято за проектними даними. Прокладку теплопроводів здійснено переважно у непрохідних каналах [9]. При каналних способах прокладання конструкція каналу огорожує теплопровід від безпосереднього впливу ґрунту і дозволяє повністю розвантажити трубопровід від тиску маси ґрунту.

Прокладання в каналах забезпечує вільне температурне переміщення трубопроводів в усіх напрямках, що дає змогу використувати вільну компенсацію температурних подовжень трубопроводів [9]. Мережна вода надходить до мікрорайону від районної котельні з параметрами для розрахункового режиму 150/70 °С. Для регулювання відпускання теплової енергії до будівель у мікрорайоні передбачено центральний тепловий пункт, на якому також здійснюється підігрівання води до 60 °С для потреб гарячого водопостачання.

За проєктними опалювальними навантаженнями приєднаних до теплових

мереж будівель визначено витрати мережної води на розрахункових ділянках теплопроводів. За розрахункову ділянку прийнято фрагмент мережі з незмінним діаметром. Гідравлічний розрахунок теплової мережі проведено з використанням спеціальної номограми [9]. Матеріальну характеристику трубопроводів мережі обчислено за формулою

$$M = \sum_{i=1}^n (d_i * l_i), \quad (1)$$

де  $d_i, l_i$  – діаметр і довжина розрахункових ділянок гілки;  $n$  – кількість розрахункових ділянок.

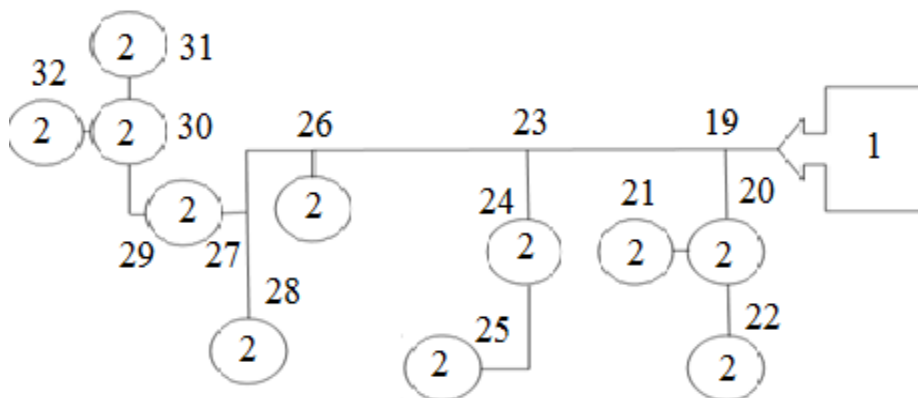


Рис. Розрахункова схема гілки опалювальної мережі мікрорайону:

1 – центральний тепловий пункт; 2 – будівлі; 19...32 – розрахункові точки теплової мережі

Таблиця 1

Характеристики системи опалення фрагменту житлового мікрорайону

Показник	Одиниця вимірювання	Значення
Максимальні витрати теплоти для опалення	МВт	8,1
Довжина теплопроводів основного напрямку	м	521
Довжина теплопроводів відгалужень	м	386
Матеріальна характеристика трубопроводів:	м <sup>2</sup>	
- основного напрямку		104
- відгалужень		99,7

Втрати теплоти трубопроводами опалювальної мережі обчислено з використанням викладеної у роботі [14] методики. Зміну теплового стану функціонуючої

теплової мережі залежно від фактичної різниці температур теплоносія і довкілля на ділянках теплопроводу оцінено за формулою

$$Q_d = q_n l_d \frac{\tau - t_0}{\tau_n - t_0} k, \quad (2)$$

де  $q_n$  – нормативні лінійні (питомі) втрати теплоти на ділянці теплопроводу;  $\tau$  – температура теплоносія на ділянці;  $l_d$  – довжина розрахункової ділянки;  $\tau_n$  – температура теплоносія, при якій здійснено нормування теплових втрат через ізоляцію трубопроводу;  $k$  – коефіцієнт для обліку втрат теплоти конструктивними елементами мережі.

Питомі теплові втрати через теплову ізоляцію трубопроводів прийнято на рівні нормативних значень [9]. Коефіцієнт  $k$  враховує втрати теплоти через опори теплопроводів, компенсатори лінійних подовжень, запірно-регулювальну арматуру тощо і обирається згідно з рекомендаціями [9] залежно від способу прокладки мережі. Розрахункову температуру ґрунту прийнято рівною 5 °С [15]. Температуру води на вході до подавального трубопроводу мікрорайонної мережі прийнято 105 °С, на

виході з системи опалення будівель – 70°С. Результати обчислень втрат теплоти подавальними трубопроводами мережі мікрорайону подано у табл. 2. Загальні втрати подавальною лінією становлять 102,5 кВт. Усереднені питомі теплові втрати подавальними трубопроводами дорівнюють 113 Вт/м. Тепловий режим трубопроводів зворотної лінії мікрорайонної опалювальної мережі визначається втратами теплоти через теплову ізоляцію і зміною тепловмісту мережної води при змішуванні потоків у трубопроводі основного напрямку і потоків води з відгалужень від основного напрямку. Температуру теплоносія змішаного потоку обчислено за формулою

$$\tau'_{\text{вих}} = \frac{\tau_{\text{вих}} G_d + \tau_{\text{від}} G_{\text{від}}}{G_d + G_{\text{від}}}, \quad (3)$$

де  $\tau_{\text{від}}$ ,  $G_{\text{від}}$  – температура і витрати теплоносія у трубопроводі відгалуження;  $\tau_{\text{вих}}$ ,  $G_d$  – температура і витрати теплоносія у трубопроводі основного напрямку.

Таблиця 2

Результати обчислень втрат теплоти подавальними трубопроводами опалювальної мережі 522-1 мікрорайону

Номер ділянки	Довжина, м	Витрати мережної води G, кг/с	Втрати теплоти на ділянці $Q_d$ , Вт	
			подавальний трубопровід	зворотний трубопровід
1	2	3	4	5
0-19	50	78,8	7915	6520
19-23	74	53	9208	6489
23-26	92	32,4	11443	8980
26-27	92	30,2	11850	8992
27-29	98	22,5	10050	7963
29-30	49	14,58	5019	3982,6
30-32	46	11,3	4708	3742
32-33	20	3,47	2044	1628
19-20	25	25,82	2569	2031
20-21	132	19,9	13565	10740
21-22	20	6,97	1876	1478
23-24	137	20,63	12871	10123
24-25	32	13,15	2721	2126
27-28	64	7,67	4922	2153
30-31	20	3,58	1697	1328,9

Результати обчислень втрат теплоти зворотними трубопроводами опалювальної мережі мікрорайону подано у табл. 2. Загальні втрати трубопроводами зворотної лінії дорівнюють 78,3 кВт. Теплові втрати розподільними трубопроводами опалювальної мережі мікрорайону в цілому при розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря становлять 180,8 кВт.

Річні втрати теплоти трубопроводами опалювальної мережі обчислено за формулою

$$Q_p = (Q_{\text{ср,п}} + Q_{\text{ср,зв}})n_o, \quad (4)$$

де  $n_o$  – тривалість опалювального періоду [12].

Втрати теплоти подавальними трубопроводами мережі при середній за опалювальний період температурі зовнішнього повітря визначено за формулою (5), зворотними трубопроводами – за формулою (6)

$$Q_{\text{ср,п}} = Q_{\text{п}}(\tau_{\text{ср,п}} - t_0)/(\tau_{\text{п}} - t_0), \quad (5)$$

$$Q_{\text{ср,зв}} = Q_{\text{зв}}(\tau_{\text{ср,зв}} - t_0)/(\tau_{\text{зв}} - t_0), \quad (6)$$

де  $Q_{\text{п}}$ ,  $Q_{\text{зв}}$  – теплові втрати при розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря подавальними і зворотними трубопроводами опалювальної мережі відповідно;  $\tau_{\text{ср,п}}$ ,  $\tau_{\text{ср,зв}}$  – температура мережної води при середній за опалювальний період температурі зовнішнього повітря у подавальному і зворотному трубопроводі відповідно;  $\tau_{\text{п}}$ ,  $\tau_{\text{зв}}$  – відповідно температура мережної води у подавальному і зворотному трубопроводах при розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря.

Обчислені за формулою (4) сумарні річні втрати теплоти трубопроводами опалювальної мережі мікрорайону в цілому дорівнюють 2184 ГДж/р.

**Висновки.** Обчислено теплові втрати для проектного варіанта виконання теплових мереж 522 мікрорайону Салтівського житлового масиву у м. Харкові. При розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря втрати теплоти подавальними і зворотними трубопроводами мережі дорівнюють відповідно 0,103 МВт і 0,783 МВт.

Обсяг річних втрат теплоти трубопроводами системи опалення становить 2184 ГДж.

### Список використаних джерел

1. Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарські потреби в Україні. Керівний технічний матеріал 204 України, 244-94. Київ, 1995. 636 с.
2. Сегединов А. А. Проблемы экономики развития инфраструктуры городов. Москва: Стройиздат, 1981. 216 с.
3. Губіна М. В. Формування житлової забудови в містах: навч. посіб. Київ: ІСДО, 1994. 136 с.
4. Атаманчук В. В. Комплексне підвищення ефективності теплозабезпечення містобудівними заходами. *Містобудування та територіальне планування*: наук.-техн. зб. Київ: Техніка, 2007. Вип. 27. С. 5–10.
5. Ahn J., Cho S. Development of an intelligent building controller to mitigate indoor thermal dissatisfaction and peak energy demands in a district heating system. *Building and Environment*. 2017. Vol. 124. P. 57–68.
6. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л., ЛЕВЧЕНКО Б. А. Проблемы энергетики на рубеже XXI столетия: учеб. пособ.; Нац. техн. ун-т «Харьковский политехнический институт». Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. 174 с.

7. Андреев С. Ю., Голованов А. П., Репин А. П. Энергосбережение в коммунальной теплоэнергетике. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. Київ: Техніка, 2007. № 3. С. 62–68.
8. Концепция оценки технического состояния городских инженерных систем и электрического транспорта г. Харькова / Л. Н. Шутенко, М. С. Золотов, Н. А. Шульга и др. *Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб.* Киев: Техника, 2007. Вып. 37. С. 131–134.
9. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / под ред. А. А. Николаева. Москва: Стройиздат, 1965. 359 с.
10. Алексахін О. О., Бобловский О. В. Спрощена методика обчислення теплових втрат трубопроводами розгалуженої опалювальної мережі з урахуванням утеплення будівель. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. Київ: Техніка, 2013. № 7(113). С. 19–23.
11. International Code Council. International Energy Conservation Code. Falls Church, VA, 2018.
12. Patrick Mitchell Central Heating, Installation, Maintenance and Repair. Writers Print Shop, 2008. 196 p.
13. ДБН В.2.6-31: 2016. Теплова ізоляція будівель. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 117 с.
14. Алексахин А. А., Бобловский А. В. Теплотери трубопроводами отопительной сети при изменении расчетной отопительной нагрузки зданий микрорайона. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. Киев: Техніка, 2011. № 9. С. 11–15.
15. ДСТУ–Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. Київ: Мінрегіонбуд, 2011. 123 с.

---

Алексахін Олександр Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки та теплових двигунів та енергетичного менеджменту Українського державного університету.

ORCID iD: 0000-0002-2253-8501. Тел.: +38 (096) 251-06-13. E-mail: aleksahin.a.a1953@gmail.com.

Дубинська Ірина Сергіївна, магістрант, група 216-ЕМ-Д20 Українського державного університету залізничного транспорту.

Соляник Ілона Сергіївна, магістрант, група 216-ЕМ-Д20 Українського державного університету залізничного транспорту.

Домбровська Жанна Михайлівна, магістрант, група 216-ЕМ-320 Українського державного університету залізничного транспорту.

Aleksakhin Alexander, PhD (Tech.), Associate Professor, department of heat engineering and heat engines and energy management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-2253-8501.

Tel.: +38 (096) 251-06-13. E-mail: aleksahin.a.a1953@gmail.com.

Dubynskaya Iryna, master, Group 216-EM-D20, Ukrainian State University of Railway Transport.

Solyanyk Iлона, master, Group 216-EM-D20, Ukrainian State University of Railway Transport.

Dombrovs'ka Zhanna, master, Group 216-EM-320, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 10.09.2021 р.

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

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

*Випуск 197*

«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., Ібрагімова Н. В., Решетилова В. В.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 17.09.2021 р.  
Формат паперу А4. Папір писальний.  
Умовн. друк. арк. 12,25. Тираж 55. Замовлення № .

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