



**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 198*

**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 № 12 від 28 грудня 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)  
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)  
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)  
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)  
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)  
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-  
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)  
Онопрійчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (ЧНТУ,  
м. Чернігів)

**Транспортні технології (275)**

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

**Теплоенергетика (144)**

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



## ЗМІСТ

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

- Чишчала В. О., Литовченко С. В., Геворкян Е. С., Нерубацький В. П., Мазілін Б. О.* Дослідження особливостей консолідації антифрикційних матеріалів на основі порошкової суміші  $\text{Cu-Pb-S}$  7

### Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Дорошенко О. Ю.* Базальтове волокно як компонент цементобетону 22  
*Кривенко П. В., Руденко І. І., Гелевера О. Г., Рогозіна Н. В.* Отримання декоративних лужно-активованих цементів при використанні шлаків з підвищеним вмістом оксидів заліза 30  
*Бабич В. Є., Поляновська О. Є., Швець І. В.* Методика визначення параметрів комбінованого армування розтягнутих та згинальних залізобетонних елементів із заданою тріщиностійкістю 40  
*Галагура Є. І., Беліченко О. А., Павлюченков М. В., Кравців Л. Б., Биченок І. В.* Експериментальні дослідження самонапруженого бетону 49  
*Толмачов С. М., Беліченко О. А., Дядюшко Р. В.* Вплив поліпропіленової фібри X-Mesh на властивості дорожнього бетону 58

### Теплоенергетика (144)

- Чередніков В. М., Череднікова О. В.* Моделювання, конструювання та випробування системи охолодження ДВЗ з метою підвищення її ефективності 66  
*Джиоєв Р. Л.* Технології спалювання деревних відходів у котлах малої потужності 82

### Транспортні технології (275)

- Новіков В. В., Бабенко А. О., Корнієнко В. О.* Визначення місця контакту та розміру поверхні кочення обода колеса на головці рейки внутрішньої нитки кривої ділянки в процесі розпирання колії 94  
*Бойко В. Д., Потапов Д. О., Демченко В. О., Молчанов В. М., Демченко О. В.* Діагностика та експериментальні дослідження стійкості колії з використанням різних типів скріплення 100  
*Потапов Д. О., Вітольберг В. Г., Бойко В. Д., Новіков В. В.* Теоретичні дослідження можливості експлуатації проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 на перспективних ділянках залізниць України, де планується впровадження швидкісного руху 110

### Геодезія та землеустрій (193)

- Гальченко Н. П., Козарь В. І., Міхно П. Б., Клюка О. М.* Концептуальне моделювання ГІС первинного обліку кадастру природно-заповідного фонду (на прикладі національного природного парку «нижньосульський») 120

**Залізничний транспорт (273)**

<i>Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Машура А. В., Гордієнко Д. А., Варв'янська В. В.</i> Синтез регулятора вихідної напруги активного чотириквADRантного випрямляча	131
<i>Панченко В. В., Туренко О. Г.</i> Дослідження роботи тягового асинхронного двигуна при несиметрії живильної напруги та аварійних режимах роботи	145
<b>Оглядіві статті</b>	
<i>Елязов І. Ш., Гусейнов І. Д., Равлюк В. Г.</i> Визначення технічних особливостей електровозів нового покоління азербайджанської залізниці	151

---

---

**МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)**

---

---

УДК 620.22

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНСОЛІДАЦІЇ АНТИФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ПОРОШКОВОЇ СУМІШІ Cu–Pb–C**

Канд. техн. наук В. О. Чишкала, доктори техн. наук С. В. Литовченко, Е. С. Геворкян, канд. техн. наук В. П. Нерубацький, асп. Б. О. Мазилін

**RESEARCH OF FEATURES OF CONSOLIDATION OF ANTI-FRICTION MATERIALS BASED ON POWDER MIXTURE Cu–Pb–C**

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

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256456>

---

---

**Анотація.** У статті наведено результати досліджень різних методів отримання антифрикційного матеріалу «мідь–свинець–графіт» методами порошкової металургії. За допомогою гарячої вакуумної електроконсолідації порошків, що є ефективною для тугоплавких матеріалів, визначено умови для роздільного холодного пресування, а саме – формування виробу при 500 МПа і спікання при 900 °С, що більш продуктивно для металевих порошків. З переліку досліджених органічних рідин було обрано гас, який дав змогу отримати якісні вироби без тріщин з густиною 5,6–5,9 г/см<sup>3</sup> при зусиллі навантаження близько 500 МПа. Спікання проводилось в інертному середовищі азоту, що дало змогу зменшити втрати свинцю до 2–5 % при температурах вище 700 °С. Твердість отриманих зразків становила 42–46 НВ за Брінеллем (135–150 МПа). Механічна обробка зразків різними різальними інструментами проводилась при різних швидкостях і показала гарну оброблюваність. Оброблені деталі при зберіганні не змінювали свої розміри. За допомогою розробленої технології можливо виготовляти композиційні матеріали з густиною 4,4–6,2 г/см<sup>3</sup> і твердістю від 30–48 НВ за Брінеллем (99,9–159 МПа).

**Ключові слова:** антифрикційні матеріали, підшипник, порошкова металургія, пресування, свинець, спікання.

**Abstract.** The article represents the results of research of various methods of obtaining antifriction material "copper-lead-graphite" by methods of powder metallurgy. With the help of hot vacuum electroconsolidation of powders, which is effective for refractory materials, the conditions for separate cold pressing are determined, namely, product formation at 500 MPa and sintering at 900 °C, which is more productive for metal powders.

The initial formation of the samples was carried out in a collapsible steel mold on a hydraulic press with a force of up to 200 tons from a mixture of powders of copper, lead and graphite, which had dimensions of 60–200 μm. Sintering was performed in a vacuum oven at temperatures of 700–900 °C for 20–30 minutes. To obtain a density of more than 5.6 g/cm<sup>3</sup>, it is necessary to significantly increase the pressure during the formation of powders. During the formation of the dry mixture, compression transverse cracks appear.

Liquefied kerosene was selected from the list of studied organic liquids, which allowed to obtain high-quality products without cracks with a density of 5.6–5.9 g/cm<sup>3</sup> at a load force of about

500 MPa. Sintering was performed in an inert nitrogen environment, which reduced lead losses to 2–5 % at temperatures above 700 °C. Nitrogen was first supplied to the vacuum chamber to a pressure of 1 atmosphere, and after increasing the temperature in the chamber, the nitrogen pressure rose to 1.2 atm.

The hardness of the obtained samples was 42–46 HB according to Brinell (135–150 MPa). Machining of samples with different cutting tools was performed at different speeds and showed good machinability. Processed parts during storage have not changed their size. With the help of the developed technology it is possible to produce composite materials with a density of 4.4–6.2 g/cm<sup>3</sup> and a Brinell hardness of 30–48 HB (99.9–159 MPa).

**Keywords:** antifriction materials, bearing, powder metallurgy, pressing, lead, sintering.

**Вступ.** Одним з найважливіших об'єктів порошкової металургії є антифрикційні матеріали. Необхідність забезпечення рухомих зчленувань машин та механізмів зносостійкими матеріалами для різних умов роботи привела до створення великої різноманітності матеріалів на основі заліза, міді та їх сплавів. Застосування спечених антифрикційних матеріалів дало змогу вирішити такі завдання, як економія кольорових металів, зниження вартості виготовлення, зменшення втрат металу при обробці, підвищення продуктивності праці, зменшення верстатного парку та ін. [1, 2].

Можливості методів отримання виробів порошкової металургії дали змогу створити складні композиційні матеріали, у яких введення тих чи інших добавок забезпечувало отримання чітко заданих властивостей [3, 4]. Якщо на початку минулого століття графіт був єдиною добавкою, що забезпечувала в матеріалі ефект сухого мастила, то останнім часом як такі присадки значного поширення набули сірка, сульфід, фториди, фторопласти. Створено матеріали, які здатні працювати при досить високих швидкостях (понад 5–10 м/с) і великих навантаженнях (більш ніж 10 МПа), під час підвищення температури (до 460 °C і вище), в умовах тертя без змащення, за наявності агресивних та інертних рідких і газових середовищ, у вакуумі, в умовах низьких температур (до мінус 260 °C) [5, 6].

Для отримання потрібних властивостей при виготовленні антифрикційних матеріалів розпочали активно використову-

вати різні методи термічної та хіміко-термічної обробки [7]. У промислових масштабах проходить виготовлення з антифрикційних матеріалів різних підшипників ковзання, торцевих ущільнень, розпірних втулок, підп'ятників, поршневих кілець тощо.

Спечені антифрикційні матеріали широко застосовуються в різних галузях техніки: в сільгоспмашинобудуванні, автомобільній промисловості, важкому, енергетичному і транспортному машинобудуванні, текстильній і харчовій промисловості, побутовій техніці, верстатобудуванні, авіаційній та космічній техніці, газотурбобудуванні, хімічному машинобудуванні та ін.

Великі потенційні можливості порошкової металургії дають змогу у міру розвитку техніки підвищувати рівень вимог до властивостей матеріалів за значеннями допустимих навантажень, швидкостей ковзання, термінів служби та інших параметрів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним з найбільш ефективних антифрикційних матеріалів є композит «мідь–свинець–графіт», особливо з великим (8–15 %) вмістом свинцю і графіту. Такі матеріали мають рекордні характеристики при швидкісному терті у рідинах та газовому середовищі [8].

Компанія «НЕОПРОМ ІНЖИНІРІНГ» (м. Харків) у партнерстві з ДО «Машинобудівний завод ФЕД» (м. Харків) випускає паливні насоси для літаків. Конструктивною одиницею такого паливного насоса є антифрикційний



підшипник «мідь–свинець–графіт». Підприємствам України, які виготовляють підшипники ковзання методом порошкової металургії, зараз не вдалося отримати необхідні характеристики.

Однією з основних технологій виготовлення антифрикційних виробів є

схема, наведена на рис. 1. Схема містить у собі приготування суміші з порошків, насичення мастилом, пресування, спікання, калібрування. У деяких випадках вироби піддають додатковим видам обробки: термічній, механічній, інколи хіміко-термічній [9].

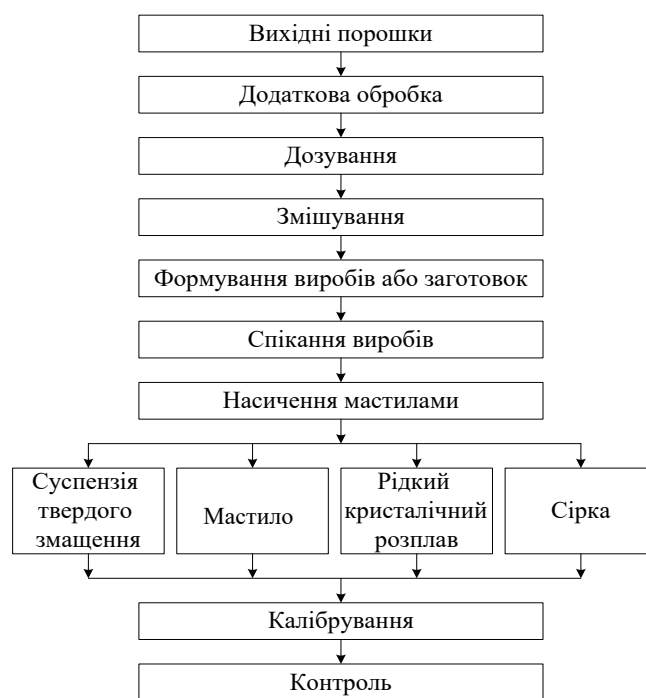


Рис. 1. Схема технології виготовлення антифрикційних виробів

Таким чином, можна зробити висновок, що питання отримання композиційного матеріалу «мідь–свинець–графіт» з необхідними характеристиками різними методами до кінця є невирішеним і актуальним.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження особливостей консолідації антифрикційних матеріалів на основі порошкової суміші «мідь–свинець–графіт».

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– запропонувати технологію отримання антифрикційного матеріалу з гомогенними властивостями, з підвищеним ресурсом роботи, без використання трудомісткого і дорогого процесу гарячого пресування;

– підібрати відповідні оптимальні додаткові компоненти для підвищення щільності та механічних властивостей матеріалу підшипника;

– визначити технологічну можливість зниження вмісту свинцю в складі матеріалу підшипника;

– розробити технологічний процес і підібрати оптимальний склад для підвищення однорідності матеріалу та ресурсу роботи підшипника.

#### Основна частина дослідження

##### Підготовка шихтових матеріалів.

До операції шихтування порошки зазвичай піддаються підготовчим обробкам: при підвищеному вмісті кисню – відновлювальному відпалу (для заліза – 700–800 °С у водні), розмелюванню, розсіву

на фракції, сушінню, прожаренню. Графіт піддають прожаренню при високих температурах (близьких до температури спікання майбутнього виробу) для видалення вологи та домішок. Сірку і сульфід висушують при низьких температурах для видалення адсорбованої вологи.

Подрібнення вихідних матеріалів, яке часто суміщає й операцію змішування вихідних компонентів, є дуже відповідальною операцією. Результат цього залежить від величини завантаження, кількості розмельних тіл, часу змішування, наявності або відсутності рідини, що вводиться в розмелювальний агрегат.

При використанні сумішей, що складаються з металевих порошоків, близьких за густиною, застосовують сухе перемішування без розмельних тіл. Для сумішей, які містять графіт, сірку або інші сухі мастила, використовують змішувачі без розмельних тіл (типу конусних, з ексцентриковими осями), щоб уникнути намазування речовин, що відіграють роль твердого змащення, на частинки порошоків металів.

При так званому мокрому змішуванні як зволожувач використовують 0,5–1 % машинного мастила (для матеріалів, що містять графіт або вуглець в іншому вигляді); до 2–3 % бензину або спирту; 1–3 % гліцерину в спирті тощо. Призначення зволожувача – усунути ліквіацію і запилювання легшого за густиною компонента шихти (графіту, сірки, сульфідів) [14].

Зазвичай змішувач заповнюють не більше ніж на 1/3 частину його об'єму. Рекомендується певна послідовність у завантаженні в змішувач окремих складових шихти. Першими завантажуються металеві порошки, потім вводиться графіт або інші добавки. Після перемішування цієї присадки протягом 5–10 хв вводять інші неметалеві присадки. Суміш у сухому стані перемішують приблизно 1–1,5 год, після чого до неї додають зволожувач і процес продовжують ще протягом 30 хв.

Допускається попереднє змішування металевих порошоків із зволожувачем з подальшим введенням речовин, що відіграють роль сухого мастила.

При необхідності забезпечення одночасного змішування рекомендуються високошвидкісні змішувальні установки – атритори.

Для збереження від окислення порошоків при подрібненні конструкція атритора передбачає можливість напуску в камеру захисного газу.

При подрібненні і змішуванні тонких порошоків можливе погіршення їх плинності. Цей недолік усувають збільшенням розміру початкових частинок, гранулюванням шихти, плакуванням неметалевих порошоків металами та ін.

Для плакування застосовують міднення та нікелювання графітового порошку хімічними і електрохімічними методами. Грануляцію тонких металевих порошоків здійснюють за допомогою добавок водного розчину полівінілового спирту, силікату натрію, рослинних речовин, що клеять, введенням розчину гліколю або камфори в етиловому спирті та ін.

**Формування виробів.** Вироби з підготовленої шихти формують різними методами: одно- і двостороннім пресуванням в пресформах на холоді, одинарним та подвійним пресуванням з проміжним спіканням, гідростатичним та ізостатичним пресуванням, спіканням під тиском, куванням і штампуванням попередньо спечених заготовок, гарячим динамічним пресуванням, вибуховим пресуванням, прокаткою, екструзією, мундштучним пресуванням, шлікерним литтям тощо [15, 16].

Більшість деталей вузлів тертя пресують із суміші вихідних порошоків на гідравлічних або механічних пресах у пресформах, виготовлених із загартованих легованих сталей або твердих сплавів. Існує велика різноманітність типів пресформ залежно від конструкції пресованих виробів і методу пресування.

Зазвичай при пресуванні підшипників застосовують двостороннє пресування. Ізостатичне пресування, як правило, використовується при високих температурах [17]. У цьому випадку як робоче середовище служать інертні гази або рідкі метали.

Пресування виробів з пористістю 15–35 %, оптимальною для антифрикційних і спечених виробів, що працюють у режимі самозмащування, проходить при одноразовому пресуванні. Вироби з меншою пористістю потребують дворазового пресування з проміжним відпалом чи інших методів ущільнення.

Величини тисків, що застосовуються при пресуванні, залежать від міцності і пластичності пресованого матеріалу, наявності мастила, конструкції пресформи, необхідної кінцевої густини та інших факторів. Наприклад, для пресування виробів з порошків заліза, міді, нікелю до пористості 15–20 % необхідний тиск 590–690 Мпа; для олова, свинцю тиск знижують до 98 МПа.

Застосування сумішей порошків з різним розміром часток, додавання м'яких металів до жорсткіших і твердих порошків дає змогу значно зменшити необхідний тиск пресування для одержання заданої густини.

**Спiкання.** Спiкання – одна з головних операцій технології виготовлення металів методами порошкової металургії [18, 19]. У процесі спiкання конгломерат з частинок речовин, що входять у вихідну шихту, перетворюється в композиційний матеріал, що складається з металевої матриці і пор або з металевої матриці, пор, неметалевих включень, інших складових, які залягають в основі металевої матриці. Процес спiкання супроводжується зміною густини, об'єму, маси спеченого брикету, утворенням нових фаз – продуктів взаємодії, які вводяться згідно з діаграмами стану та характером їх взаємодії [20, 21]. Є велика різноманітність варіантів процесів спiкання, а саме: за характером основного процесу – спiкання у твердій фазі і за наявності рідкої фази; за характером захисних середовищ – спiкання

в газовому і відновному середовищі, у вакуумі, у герметичних коробках з твердим засипанням; за характером нагрівання – спiкання в електричних печах з радіаційним нагріванням, з індукційним нагріванням, з електророзрядним нагріванням; за типом обладнання – спiкання в прохідних конвеєрних або штовхальних печах, в садочних печах тощо [22, 23].

Для експериментальних робіт при виготовленні невеликих партій виробів використовують печі періодичної дії з ручним пересуванням виробів.

Для спiкання у вакуумі застосовуються вакуумні печі з індукційним нагріванням, як правило, для виготовлення невеликих дослідних партій виробів.

Для спiкання порошкових матеріалів в інертному середовищі або в середовищі, у якому проводиться насичення деякими елементами, використовують герметичні контейнери з жароміцної сталі. Вироби закладають у контейнер під засипкою, яка може містити речовини, що дають змогу проводити одночасно зі спiканням хіміко-термічну обробку (азотування, карбонізацію, силіціювання, хромування та ін.). Герметичність контейнера в процесі нагрівання забезпечується затвором, який засипається піском і порошком речовин, що плавляться при нагріванні, забезпечуючи герметизацію внутрішнього простору.

У процесі спiкання залежно від складу шихти окремі компоненти можуть повністю або частково реагувати один з одним, утворюючи нові сполуки, або залишатися у вигляді інертних включень.

Інтервал температур спiкання зазвичай вибирають у межах 70–80 % температури плавлення металу, проте в кожному окремому випадку він уточнюється експериментально з урахуванням необхідних властивостей, структури композиційного матеріалу та виду виробів.

У процесі спiкання змінюються розміри виробу. Усадка матеріалу при спiканні залежить від температури, часу, складу захисного середовища і вихідної

густини заготовок. У ряді випадків, наприклад при підвищенні густини мідних заготовок, можливе збільшення розмірів брикету замість усадки, тому що при взаємодії водню, який дифундує, з оксидами міді утворюються пари води, які створюють підвищений тиск газів унаслідок більшого об'єму молекул парів води порівняно з об'ємом водню.

**Отримання антифрикційних матеріалів на основі міді.** Основним завданням є створення більш простого способу отримання антифрикційних порошкових матеріалів на основі міді, що забезпечує зниження зносу сполучених з ними деталей, які розміщені у вузлах тертя.

Поставлене завдання вирішується методом отримання порошкових антифрикційних матеріалів на основі міді та має основні етапи: приготування шихти, що містить порошки міді, графіту та свинцю, її пресування при тиску 250–270 МПа та спікання в захисному середовищі при температурі 890–910 °С протягом не менше 60 хв.

Для збільшення густини антифрикційного матеріалу отриману шихту цього матеріалу піддають додатковому відпалу (рекристалізації) перед основним спіканням при температурі 550–600 °С протягом 1,5–2 год.

Введення в шихту порошку міді активізує дифузійні процеси при спіканні, зменшуючи тим самим ефект обволікання частинок міді графітом у процесі спікання, що перешкоджає утворенню та росту контактів між частинками під час спікання. Крім того, введення порошку міді забезпечує появу рідкої фази при спіканні, що сприяє утворенню контакту між частинками і сприятливо впливає на кінетику спікання і формування структури матеріалу, збільшуючи його густину.

Загальний вміст міді встановлюється таким чином, щоб забезпечити необхідну густину, пористість і усадку матеріалу при спіканні виробів.

Вміст графіту в шихті забезпечує високий мастильний ефект, одночасно

даючи змогу зберегти високу міцність одержуваного матеріалу, тобто надає останньому високі експлуатаційні властивості.

Розміри частинок порошку міді і графіту, які безпосередньо використовуються при виготовленні цього виробу, справляють істотний вплив на якість одержуваних матеріалів, оскільки зі зменшенням розміру частинок погіршуються їхні пресувальні характеристики (усадка), однак міцність пресованих виробів з більш дрібних порошоків виявляється вищою, ніж міцність виробів, отриманих з крупнішого порошку того ж металу.

Розміри частинок порошку впливають на вибір тиску при пресуванні. З підвищенням дисперсності частинок зменшується насипна густина порошку, збільшується питома поверхня і поверхня тертя частинок, а отже, для отримання пресованих виробів заданої густини необхідний більш високий тиск.

Теоретично й експериментально підібрано оптимальний для цього методу розмір частинок порошку міді і графіту для отримання антифрикційних порошкових матеріалів на основі міді – 250 мкм.

Після додаткового відпалу зростає пластичність частинок порошку і збільшуються їхні пресувальні характеристики. Ця операція має важливий внесок у зниження коефіцієнта тертя, а також інтенсивності зношування одержуваних антифрикційних виробів за рахунок отримання більш щільних заготовок як після пресування, так і після спікання. Цей інтервал навантаження при формуванні виключає можливість того, що матеріал не пройде повну усадку під час пресування, що призводить до недостатньої міцності виробів, і водночас не допускає розшарування матеріалу й утворення тріщин, причиною яких може бути занадто високий тиск навантаження.

Під час спікання заготовки без захисного середовища відбувається окислення поверхні частинок. У процесі спікання заготовок у відновному

середовищі йде відновлення-перебудова решітки оксидів у решітку металу. Надалі безпосередній контакт між частинками в міру нагрівання збільшується доти, поки пори повністю не закриваються.

Оптимальна швидкість нагрівання заготовок міститься в інтервалі 1,5–1,7 °C/с і забезпечує високу якість одержуваного матеріалу й одночасно досить високу продуктивність процесу.

Завдяки своїй структурі, яка підкоряється принципу Шарпі, коли в пластичній основі рівномірно розподілені тверді вclusions, на які спираються при терті контртіла, наприклад вал, ці матеріали мають гарні триботехнічні властивості.

Процес тертя для таких матеріалів має такий вигляд: у ході припрацювання м'яка матриця інтенсивно зношується до появи твердих кристалів із загальної маси, припрацювання закінчується, коли контртіло (вал, опорна п'ята) починає повністю спиратися на тверді частинки, які забезпечують високу зносостійкість антифрикційного матеріалу. М'яка основа при цьому, зношуючись швидше, утворює мережу каналів (мікрорельєф) між виступаючими кристалами, по яких циркулює мастило. Пластична основа (матриця) забезпечує захисну реакцію (пружну або пластичну деформацію та ін.) всього підшипникового матеріалу, що впливає на зміну умов тертя і великі показники припрацювання.

Є ще один метод отримання порошкового антифрикційного матеріалу на основі міді (склад, % мас.: алюміній 10,5–12; залізо 0,5–1,5; порошок нікель-титанового сплаву ПН 45155 4–8; графіт 0,3–4; мідь ін.), за яким експлуатаційні триботехнічні властивості запропонованих спечених матеріалів вищі порівняно з аналоговими. Цей метод належить до порошкової металургії, зокрема до спечених антифрикційних матеріалів на основі міді для виготовлення антифрикційних деталей, що мають працювати в умовах змащення при середніх і високих навантаженнях.

Відомі спечені антифрикційні матеріали на основі міді з добавками алюмінію, заліза, нікелю, титану для виготовлення антифрикційних, стійких до зносу, композиційних матеріалів і деталей, що працюють в умовах самозмащення. Недоліками відомих матеріалів є підвищений знос і порівняно невисокі початкові допущені навантаження на деталі, які працюють в умовах тертя. Основна мета технології отримання матеріалу з поставленими характеристиками – підвищення зносостійкості відомих спечених матеріалів на основі міді при граничних характеристиках самозмащування і більш високих навантаженнях при терті, збільшивши характеристики міцності на стиск (основний показник міцності для підшипникових матеріалів).

Поставлені завдання вирішено завдяки поліпшенню хімічного складу введенням нових додаткових компонентів. Суть нових змін полягає в тому, що додаються нові матеріали до складу. Введення до складу матеріалу порошку ПН45Т55, що складається головним чином з титано-нікелевого інтерметаліду, призводить до дисперсійного зміцнення поверхневих шарів тертя, завдяки чому опір на місцях з найбільшою зношуваністю збільшується, що призводить до зменшення зносу, підвищення гранично допустимих навантажень, міцності матеріалу. Таке зміцнення більш ефективно завдяки зміцненню розчину міді із залізом, тому кількість останнього слід дещо зменшити. Крім того, введення до складу запропонованого матеріалу графіту сприяє поліпшенню граничного змащення (завдяки утворенню масляно-графітової суспензії), що призводить до надійнішого розділення поверхні сталюого вала та підшипника, які мають тертя, і як наслідок, збільшення допустимих навантажень, зниження зносу.

**Експериментальна частина.** У роботі потрібно було використати іншу технологію виробництва заготовки антифрикційного матеріалу на основі міді. З огляду на це маємо такі дані:

– пресування сухої композиції порошків при тиску 200 МПа призводить до появи пресувальних тріщин, які не ліквідуються в процесі спікання у вакуумі, та недостатньої густини кінцевого продукту (4,4–4,8 г/см<sup>3</sup>);

– при спіканні у вакуумі через випаровування свинцю (який має високу пружність пари у цих умовах) спостерігається негомогенність розподілу елементів у виробі.

Представлений зразок замовника мав густину 5–5,2 г/см<sup>3</sup> і твердість за Брінеллем 26–28 НВ. Ураховуючи, що твердість гаряче-пресованих виробів становить 6,0–6,2 г/см<sup>3</sup> та має твердість 48 НВ, та з огляду на перераховане можливо зробити такі висновки:

– за рахунок значного перевершення густини і твердості можливі великі пружні навантаження в об'ємі матеріалу, які призводять до розширення після механічної обробки;

– використання вакууму у цьому випадку при спіканні виробів не є доцільним, а оскільки спікання у повітряному середовищі призводить до окиснення всіх компонентів суміші, то потрібно використовувати атмосферу інертних газів;

– використання тиску при компактуванні менше 200 МПа не є доцільним, тому потрібно використовувати більш ефективні добавки та більші значення тиску.

**Обладнання та матеріали.** У роботі використовувались порошки міді марки

ПМС-1 (ГОСТ 4960-2009 до 100 мкм), свинцю марки ПС-1 (ГОСТ 16138-78 до 60 мкм) і графіт марки ЕГ-1, отриманий подрібненням і просіюванням порошку через сито менше 80 мкм.

Заготовки підшипників марки МСП відповідно до ТУ 16-538.157-72 повинні мати такий склад: мідь 75–80 % мас.; свинець 8–11,5 % мас.; графіт 12–13,5 % мас. Твердість матеріалу – 80–180 МПа. При механічній обробці різцями і фрезами матеріал не повинен кришитись.

Розміри заготовки для антифрикційного підшипника МСП повинні мати такі розміри: діаметр зовнішній – 81 мм; діаметр внутрішній – 58 мм; висота – 25 мм.

У цій роботі було використано таке обладнання: кульовий млин з поліуретану; вібраційний млин; три різних гідравлічних преси (ПГПр зусиллям 4 т; Dezimalpresse DP 36 – 50 т; ДГ2434 – 250 т); вакуумна піч СШВЕ-1,25; дві пресформи.

Порошки міді і свинцю було закуплено, а порошок графіту отримано методом подрібнення електрографіту ЕГ-1 у вібраційному млині (рис. 2). Після подрібнення графіт просіювався для отримання однорідного за розміром порошку, відсіювалась різна дисперсність. Графіт з дисперсністю менше 60 мкм і 100 мкм не використовувався, оскільки він не підходить для отримання цього матеріалу. Основною причиною є поява пресувальних тріщин.



Рис. 2. Вібраційний млин для подрібнення графіту

Змішування компонентів суміші проходило в кульовому млині з поліуретану, враховуючи відомості [24]. Пресування відбувалось у жорсткій сталевій формі з необхідними розмірами на пресах ПГПр4 (рис. 3), ДР-36 та ДГ2434 при зусиллі 4,50 та 200 т відповідно. Для спікання зразків матеріалу МСП використовувалась вакуумна піч СШВЕ-1,25 при температурі до 900 °С.

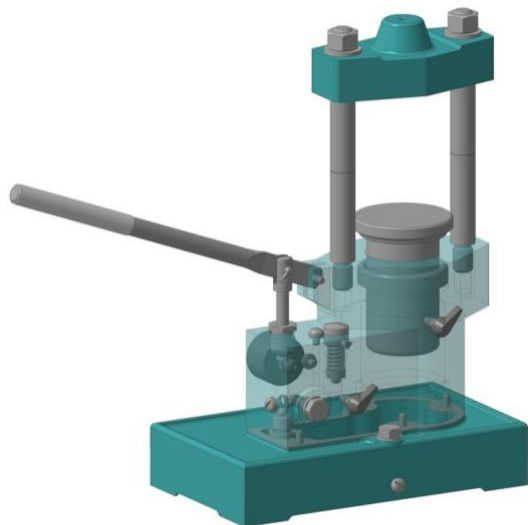


Рис. 3. Прес для формування зразків ПГПр

Пресування на зразках, на яких проводилися первинні дослідження (підбір тиску, температури спікання і додаткового пресування), виконувались на пресі ПГПр4 з тиском 500 МПа.

Технічні характеристики преса ПГПр4 такі: діаметр великого поршня – 58 мм; діаметр малого поршня – 10 мм; хід великого поршня – 60; хід малого поршня – 20; максимальна відстань між поршнем і верхньою плитою – 120.

Пресування проводилося в жорсткій сталевій пресформі (рис. 4), а спікання – у графітовій (рис. 5), які було зроблено під потрібні розміри зразків.



Рис. 4. Сталева пресформа



Рис. 5. Графітова пресформа

Після отримання потрібних характеристик на малих зразках було

використано гідравлічний прес ДГ2434 (рис. 6) із зусиллям до 250 т. Технічні

характеристики гідравлічного преса ДГ2434 такі: номінальне посилення преса, кН(тс) – 2500(250); найбільший хід штока (повзуна), мм – 710; найбільша відстань між столом і штоком – відкрита висота преса, мм – 1250; розміри столу, мм – 1120/1000; номінальне посилення нижнього поршня вгору, кН(тс) – 500(50); хід нижнього поршня, мм – 360; швидкість робочого ходу поршня (при ході

вгору), мм/с – 5–30; швидкість поворотного ходу поршня (при ході донизу), мм/с – 80; максимальна витримка під тиском, с (хв) – 1–1000 (16).

Після пресування суміші порошоків проводилось спікання у вакуумній печі СШВЕ-1,25 з максимальною температурою до 2500 °С (рис. 7).



Рис. 6. Гідравлічний прес ДГ2434



Рис. 7. Вакуумна піч СШВЕ-1,25

Дослідження технологічних параметрів отримання заготовки МСП (підготовка шихти, пресування, спікання, повторне пресування) проводилось на зразках (рис. 8) діаметром 11,5 мм та висотою 15–25 мм. Після визначення цих параметрів було отримано заготовку з урахуванням лінійних розмірів.

Перша партія зразків була виготовлена з порошоків без додавання органічних рідин, що призвело до появи пресувальних тріщин при тиску більше 200–250 МПа. Відомо, що додавання деяких органічних рідин допомагає отримати більшу густину та міцність при збільшенні тиску без

пресувальних тріщин [25]. Було використано три рідини: бензин, спирт і гас. Використання гасу дало змогу отримати більш технологічні суміші.

Під час спікання зразка у вакуумі гас розпадається на легкі вуглеводні та піролізний вуглець (коксівий залишок), який, можливо, знижує випаровування свинцю. При додаванні спирту та бензину спостерігалось швидке випаровування цих рідин, що не давало змоги отримати зразки з потрібними властивостями. Було виявлено оптимальну концентрацію гасу при додаванні його в суміш (рис. 9).



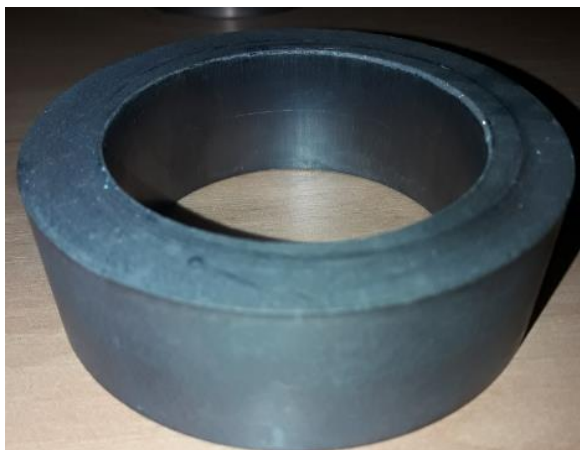


Рис. 8. Отримана заготовка

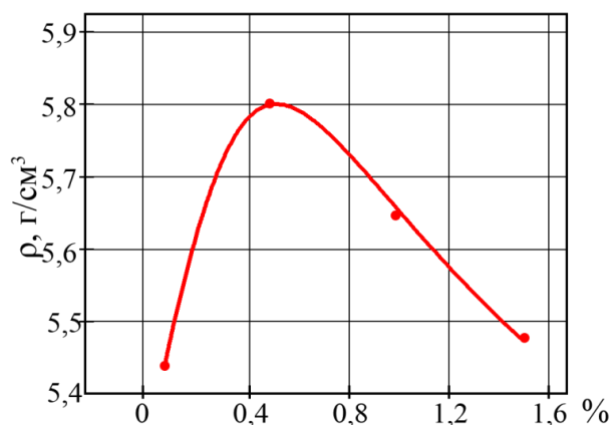


Рис. 9. Залежність густини від концентрації газу в суміші

Вихідні порошки міді 100 та 200 мкм змішувались у різних пропорціях за вмістом міді, % мас.: 25/75, 50/50, 75/25. Змішування різних фракцій міді з графітом і свинцем з додаванням різної концентрації газу показало й дало змогу підібрати більш оптимальний варіант отримання зразка. Додавання фракції міді 25/75 % з додаванням 0,1 % газу при тиску 500 МПа до і після спікання призвело до появи пресувальних тріщин, зразки яких мали густину 5,6 г/см<sup>3</sup>. З додаванням газу в концентрації 0,5 % з тими самими параметрами тиску було отримано зразок без появи пресувальних тріщин із густиною 5,9 г/см<sup>3</sup>. Концентрація газу 1 % приводить до рівномірного змішування суміші без появи пресувальних тріщин з густиною 5,8 г/см<sup>3</sup>. Фракція міді 50/50 % мас. Додавання 0,1 % газу також призвело до

появи пресувальних тріщин тільки з кращою усадкою шихти і густиною 5,85 г/см<sup>3</sup>. При додаванні газу в концентрації 0,5 % суміш рівномірно розподілилась при змішуванні, після пресування при тиску в 500 МПа пресувальних тріщин не було знайдено, отримана густина 6,05 г/см<sup>3</sup>. За концентрації газу 1 % отримана густина 5,97 г/см<sup>3</sup>. Для суміші з концентрацією міді з дисперсністю 75/25 %, мас. аналогічні параметри змішування, пресування і кінцевої густини як у суміші з концентрацією міді з дисперсністю 25/75 %, мас.

Після проведення цих досліджень і порівняння отриманих характеристик було вирішено продовжити проводити подальші дослідження на суміші з дисперсністю міді 50/50 % мас, оскільки отримана густина і твердість отриманого зразка мала потрібні значення (рис. 10).

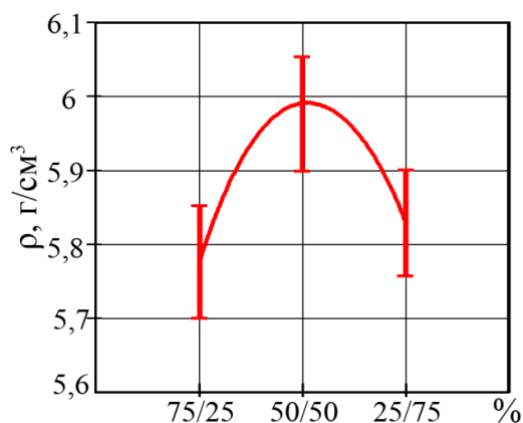


Рис. 10. Залежність густини від концентрації міді з різною дисперсністю

Спикання зразків без додавання гасу і пресування при тиску 200 МПа приводить до втрати свинцю до 20 % при температурі 900 °С. Відпресовані з додаванням гасу зразки композиту при тиску 500 МПа і подальшому спіканні при тій самій температурі втрачали 12 % мас. свинцю. Для зменшення втрат свинцю (який є отруйним), було запропоновано замість вакууму використовувати інертні гази – аргон, азот та вуглекислий газ. Аргон значно дорожчий за азот, а вуглекислий газ при термічних процесах може мати окислювальні властивості [26], тому було обрано азот. Для спікання зразків, після попереднього вакуумування, було здійснено напуск азоту у вакуумну камеру до 1 атм. У процесі нагрівання тиск у камері збільшувався до 1,2 атм. Спикання зразків при температурі 900 °С показало зменшення втрати свинцю до 2–5 %.

Додаткове пресування зразка після спікання дає змогу отримати густину на 3–5 % більшу ніж у зразку, який не проходив додаткове пресування. Цей метод дає змогу досягти густини 6,05–6,2 г/см<sup>3</sup> і твердості 42–48 НВ.

Для виготовлення заготовки МСП підшипника була використана сталева пресформа. Початкове пресування виконувалось на пресі ДГ2434 при тиску 140 т. Отримана заготовка відповідала необхідним розмірам, після чого була спечена в печі СШВЕ-1,25 в атмосфері азоту при тиску 1,2 атм і температурі 900 °С протягом 30 хв. Втрата свинцю не перевищувала 3 % мас. Повторне пресування проводилось у тій самій пресформі при тиску 140 т. Після цього заготовку було оброблено на токарному верстаті при різних умовах обробки (рис. 11).

Густина підшипника становила 6,05 г/см<sup>3</sup>, твердість 47 НВ. Зміни технічних характеристик та розмірів при витримці впродовж 1 місяця виявлено не було.



Рис. 11. Антифрикційний підшипник з матеріалу МСП

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

– запропоновано технологію отримання антифрикційного матеріалу з гомогенними властивостями, з підвищеним ресурсом роботи, без використання трудомісткого і дорогого процесу гарячого пресування антифрикційного матеріалу МСП, який не є доцільним через розпухання заготовок після механічної обробки, а також через малу продуктивність і негомогенність отриманого матеріалу (точкові втрати свинцю);

– підібрано відповідні оптимальні додаткові компоненти для підвищення щільності та механічних властивостей матеріалу підшипника, зокрема для отримання густини, більшої ніж 5,4 г/см<sup>2</sup>, було застосовано добавку гасу в суміш, а також збільшено навантаження при пресуванні до 500 МПа;

– визначено технологічну можливість зниження втрати свинцю в складі матеріалу підшипника шляхом використання азотного середовища при тиску 1,2 атм у процесі спікання;

– розроблено технологічний процес та підібрано оптимальний склад для підвищення однорідності матеріалу й ресурсу роботи підшипника, отримано

заготовки антифрикційного матеріалу МСП, а також виготовлено підшипники, які відповідають усім вимогам до виробу

(насамперед підвищується щільність і відповідно, механічна міцність та ресурс роботи підшипників).

### Список використаних джерел

1. Tribological and mechanical properties of copper matrix composites reinforced with carbon nanotube and alumina nanoparticles / Y. Pan, X. Lu, A. A. Volinsky, B. Liu, S. Xiao, C. Zhou, Y. Li, M. Chen and X. Qu. *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6. Nu. 11. DOI: 10.1088/2053-1591/ab4674.
2. Інтегровані технології обробки матеріалів: підручник / Е. С. Геворкян, Л. А. Тимофєєва, В. П. Нерубацький, О. М. Мельник. Харків: УкрДУЗТ, 2016. 238 с.
3. Нові керамічні композиційні матеріали інструментального призначення: монографія / Р. В. Вовк, Е. С. Геворкян, В. П. Нерубацький та ін. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2018. 200 с.
4. 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.
5. Moazami Goudarzi M., Jenabali Jahromi S. A., Nazarboland A. Investigation of characteristics of tin-based white metals as a bearing material. *Materials and Design*. 2009. Vol. 30, Iss. 6. P. 2283–2288.
6. Composite material for instrumental applications based on micro powder  $Al_2O_3$  with additives nano-powder SiC / E. S. Gevorkyan, M. Rucki, A. A. Kagramanyan, V. P. Nerubatskiy. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019. Vol. 82. P. 336–339. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.05.010.
7. Структура и магнитные свойства нанопорошков Cu–Co и Cu–Fe, полученных в ультразвуковой мельнице / В. М. Надутов, А. Е. Перекос, Б. Н. Мордюк, В. З. Войнаш, В. П. Залуцкий, Н. А. Пискун, Т. Г. Кабанцев. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2017. Т. 39, № 4. С. 525–539. DOI: 10.15407/mfint.39.04.0525.
8. Effects of Strong Pulse Current on Microstructure and Properties of Cu-20Pb Eutectic Alloy / T. Yu, L. Zhang, D. Wang, C. Qin, G. Geng. *Special Casting and Nonferrous Alloys*. 2018. Vol. 38, Iss. 12. P. 1389–1392.
9. Вайнштейн В. Э., Троянская Г. И. Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. Москва: Машиностроение, 1968. С. 58–60, 84–88.
10. Геворкян Э. С., Нерубацкий 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.
11. Нерубацький В. П. Моделювання процесу гарячого пресування при спіканні тугоплавких нанопорошкових з'єднань. Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 20–22 травня 2009 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2009. Ч. 1. С. 362.
12. Cutting composite material based on nanopowders of aluminum oxide and tungsten monocarbide / E. S. Gevorkyan, V. P. Nerubatskiy, V. O. Chyshkala, O. M. Morozova. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. Issue 15. Part 2. P. 6–14. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-15-02-020.
13. Composite material for instrumental applications based on micro powder  $Al_2O_3$  with additives nano-powder SiC / E. S. Gevorkyan, M. Rucki, A. A. Kagramanyan, V. P. Nerubatskiy.

*International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019. Vol. 82. P. 336–339. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.05.010.

14. Спеченный антифрикционный материал на основе меди: Патент 790821 / Альтман В. А., Боровинская И. П., Валакина В. М., Глушкин Я. А., Мемелов В. Л., Прокудина В. К., Щепинова Л. П., Беляков В. А. Опубл. 15.04.1994.

15. Effect of high density electric current pulse on solidification of Cu-37.4 wt.%Pb monotectic alloy melt / T. Ma, G. Geng, X. Sun, X. Hao, W. Hao. *Materials Science*. 2020. Vol. 26, No. 1. P. 34–40. DOI: 10.5755/j01.ms.26.1.21060.

16. Some features of ceramic foam filters energy efficient technologies development / E. S. Gevorkyan, V. P. Nerubatskyi, Yu. H. Gutsalenko, O. M. Morozova. *Modern engineering and innovative technologies*. 2020. Iss. 14. Part 1. P. 46–60. DOI: 10.30890/2567-5273.2020-14-01-014.

17. Helle A. S., Easterling K. E., Ashby M. F. Hot-Isostatic Pressing Diagrams: New Developments. *Acta Metallurgica*. 1985. Vol. 33, No. 12. P. 2163–2174.

18. Design and optimization of coating structure for the thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying via finite element method / L. Wang, X. H. Zhong, Y. X. Zhao, S. Y. Tao, W. Zhang, Y. Wang, X. G. Sun. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2014. Vol. 2. P. 102–116.

19. Examination of patterns in obtaining porous structures from submicron aluminum oxide powder and its mixtures / E. Gevorkyan, V. Nerubatskyi, Yu. Gutsalenko, O. Melnik, L. Voloshyna. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6 (108). P. 41–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216733.

20. 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.

21. Arzt E. L., Ashby M. K. Easterling K. E. Practical Applications of Hot-Isostatic Pressing Diagrams Four Case Studies. *Metallurgical Transactions*. 1983. Vol. 14A, No. 1. P. 211–221.

22. Novel Design of Copper–Graphite Self-Lubricating Composites for Reliability Improvement Based on 3D Network Structures of Copper Matrix / X. Jiang, J. Song, Su Y., Y. Zhang, L. Hu. *Tribology*. 2018. Vol. 66, Iss. 4. DOI: 10.1007/s11249-018-1098-7.

23. Technological Parameters of Production and Properties of Babbit-Based Composite Surfacing Rods and Deposited Antifricition Coatings / I. E. Kalashnikov, A. G. Kolmakov, L. K. Bolotova, P. A. Vykov, L. I. Kobeleva, R. S. Mikheev, M. L. Kheifets. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10, Iss. 3. P. 635–641.

24. Вплив ультразвукового оброблення в кульовому млині на фазово-структурні характеристики високодисперсних порошкових сумішей міді з залізом і кобальтом / В. М. Надутов, А. О. Перекос, Б. М. Мордюк, В. З. Войнаш, Т. В. Єфімова, В. П. Залуцький, Т. Г. Кабанцев. *Металлофізика и новейшие технологии*. 2018. Т. 40, № 4. С. 501–514. DOI: 10.15407/mfint.40.04.0501.

25. The formation of ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nanoparticles from fluoride solutions / E. S. Gevorkyan, O. M. Morozova, D. S. Sofronov, V. P. Nerubatskyi, N. S. Ponomarenko. 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.

26. 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.

---

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 Едвін 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 (095) 045-78-01. 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.

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, Dr. 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, Dr. 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 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Mazilin Bogdan Olexandrovych, Postgraduate, 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.

Статтю прийнято 25.11.2021 р.

УДК 666.972.16

**БАЗАЛЬТОВЕ ВОЛОКНО ЯК КОМПОНЕНТ ЦЕМЕНТОБЕТОНУ**

Канд. техн. наук О. Ю. Дорошенко

**BASALT FIBER AS A COMPONENT OF CEMENT CONCRETE**

PhD (Tech.) A. Doroshenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256504>

---

---

**Анотація.** У статті розглянуто експериментально-теоретичне обґрунтування використання базальтового волокна, як перспективного матеріалу, за допомогою якого можливо отримати новий клас будівельних матеріалів. Наведено аналіз основних волокон, використовуваних тепер при отриманні будівельних матеріалів як мікроармуючого компонента. Виконано порівняльний аналіз волокон за сукупністю показників: геометрії, хімічного складу, фізико-механічних характеристик.

**Ключові слова:** базальтоне волокно, мікроармуючі компоненти, хімічний склад, фізико-механічні характеристики, бетон, транспортне будівництво.

**Abstract.** In the article we consider. The analysis of the main fibers currently used in the production of building materials as a microreinforcing component is presented. A comparative analysis of fibers on a set of indicators: geometry, chemical composition, physical and mechanical characteristics.

Recently, there has been a steady trend towards finding ways to reduce the cost of road construction caused by higher prices for materials and energy. That is why modern road construction conditions dictate the widespread use of industrial waste - slag, burnt shale dumps of coal mines, fly ash, as well as virtually inexhaustible resources - chalk deposits and igneous rocks (basalts).

Properties of basalt fibers open wide prospects for their use for reinforcement of concrete structures in the construction of bridges, tunnels, dams, floor structures, runways and other structures, where exposure to moisture, salt solutions and alkaline concrete media leads to corrosion of metal reinforcement.

Based on the properties, basalt fibers have an extremely broad prospect of application in various industries and construction: as structural building elements: bridges, tunnels, railway sleepers and subways; as facing materials: facing mixes and reinforcing grids; as reinforcing materials: in the production of cement and asphalt pavements, building blocks and foam concrete materials; as a reinforcing material for the construction of dams, materials for land irrigation and other hydraulic structures.

Thus, basalt fiber is a promising material with which it is possible to obtain a new class of building materials

Analysis of the main fibers currently used in the production of building materials as a microreinforcing component, according to a number of variable criteria, allowed to identify basalt fiber as the most rational in terms of its use in obtaining fine-grained microreinforced cement, including for road construction. The comparative analysis of fibers of 4 manufacturers on set of

*indicators: geometry, chemical composition, physical and mechanical characteristics, allowed to allocate fibers of LLC Armbud which most corresponds to the shown requirements.*

*It is established that the basalt fiber in the process of keeping in an aggressive and alkaline environment with a pH corresponding to the hydration of cement stone, is subject to significant dissolution. After 28 days of exposure in an alkali solution, the weight loss is about 30%. Prolonged storage of fiber (72 days) in solution leads to weight loss of up to 59%. It becomes obvious the need to develop a method of increasing the alkali resistance of basalt fiber to increase its durability.*

**Keywords:** *basalt fiber, microreinforcing components, chemical composition, physical and mechanical characteristics, concrete, transport construction.*

**Вступ.** Нині загальна протяжність цементобетонних доріг у світі становить понад 40 %, тоді як в Україні більш ніж 95 % доріг з асфальтобетонним покриттям. Необхідно враховувати, що, на думку експертів, світові запаси нафти будуть виснажені через 30 років. При цьому обсяги виробництва цементу щорічно зростають. Причиною, що стримує упровадження цементобетону для покриття доріг, є його невисока міцність при вигині. Одним з рішень зазначеної проблеми є використання армуючих компонентів, зокрема неметалевої фібри, наприклад базальтового волокна. Однак базальтове волокно характеризується низькою лугостійкістю, зокрема й щодо цементного каменю. Підвищення ефективності базальтової фібри можливе завдяки її модифікації. Використання модифікованої фібри при виробництві дорожнього дрібнозернистого цементобетону дасть змогу отримувати матеріали з необхідними техніко-експлуатаційними характеристиками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останні десятиліття проблема передчасного руйнування на нежорстких покриттях автомобільних доріг виходить на перший план серед усіх інших проблем дорожньо-будівельної галузі. Внаслідок різних деформацій, викликаних демпфіруючими навантаженнями, відбувається передчасне руйнування конструкцій, що призводить до необхідності більш частої заміни покриття на автомобільних дорогах, а також до збільшення вартості автомобільних перевезень через низький рівень споживчих характеристик. Таким

чином, знижується рівень безпеки руху на автомобільних дорогах, а також завдається значної шкоди економіці країни.

Дослідження в галузі дорожнього бетону, які спрямовані на вивчення міцнісних показників цементобетону залежно від міцності портландцементу різних заводів, було розпочато в 1930 р. [1] в Ленінградському інституті шляхів сполучення.

У рамках розвитку технологічної теорії дорожнього бетону вчені встановили, що макроструктура бетону характеризується коефіцієнтом розсунення. Крупний заповнювач (щебінь), істотно впливає на повітреутримуючу здатність і седиментаційну стійкість бетонних сумішей із залученим повітрям на основі комплексних хімічних домішок, на порову структуру, міцність і морозостійкість бетону. Було виявлено особливості глибинного віброуцільнення бетонних сумішей із залученим повітрям і встановлено загальні залежності, що зв'язують параметри глибинного вібрування з характером порової структури бетону і його властивостями.

Широке впровадження будівництва цементобетонних покриттів слід віднести до 1951 р., коли почався серійний випуск спеціалізованих машин, що дали змогу здійснити комплексну механізацію улаштування цементобетонних покриттів [2–4].

Останнім часом характерна стійка тенденція до пошуків шляхів зменшення вартості дорожнього будівництва, спричинена подорожчанням матеріалів та енергії. Саме тому сучасні умови дорожнього будівництва диктують широке

використання відходів промисловості (шлаки, горілі сланці відвалів кам'яновугільних шахт, золи уносу), а також практично невичерпних ресурсів (крейдянні поклади і магматичні породи (базальти)).

Виникнення колії на дорогах з нежорсткими покриттями призводить до зниження ефективності використання фінансових ресурсів, спрямованих у дорожню галузь, оскільки з'являється необхідність проводити ремонт покриття автомобільної дороги набагато частіше, ніж це передбачено нормативними документами.

На автомобільних дорогах з жорстким дорожнім одягом прояв такого дефекту покриття, як колійність, неможлива у зв'язку з великим модулем пружності, але цементобетонні покриття мають ряд недоліків – лущення, наявність дрібної сітки тріщин, що призводить до виникнення як поздовжніх, так і поперечних тріщин.

Перші дослідження можливостей виробництва базальтових волокон було розпочато на початку 60-х рр. [5], коли було виготовлено перші зразки базальтового волокна. Потім було проведено тривалі дослідження характеристик базальтових волокон та матеріалів, розроблених на їх основі.

Властивості базальтових волокон відкривають широкі перспективи їх застосування для армування бетонних конструкцій при будівництві мостів, тунелів, гребель, конструкцій перекриттів, злітно-посадкових смуг та інших конструкцій, де вплив вологи, розчинів солей та лужних бетонних середовищ призводить до корозії металевої арматури [4–7].

Зважаючи на властивості, базальтові волокна мають надзвичайно широку перспективу застосування в різних галузях промисловості і будівництва [8–10]:

- як конструктивні будівельні елементи: мости, тунелі, шпали залізниць і метро;
- як облицювальні матеріали: облицювальні суміші та армуючі сітки;
- як армуючі матеріали: при виробництві цементобетонних і асфальто-

бетонних покриттів доріг, будівельних блоків та пінобетонних матеріалів;

- як армуючий матеріал для будівництва гребель, матеріали для іригації земель та інших гідротехнічних споруд.

Таким чином, базальтове волокно є перспективним матеріалом, за допомогою якого можливо отримати новий клас будівельних матеріалів.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Розроблення ефективного дрібнозернистого цементобетону з використанням базальтового волокна як мікроармуючого компонента для дорожнього будівництва.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- аналіз основних волокон, використаних тепер при отриманні будівельних матеріалів як мікроармуючого компонента;
- порівняльний аналіз волокон за сукупністю показників: геометрії, хімічного складу, фізико-механічних характеристик

**Основна частина дослідження.** Отримання ефективних будівельних матеріалів і виробів, до яких сьогодні ставляться все більш високі вимоги, може бути досягнуто застосуванням технологій, які використовують композиційні матеріали. Одним з перспективних конструкційних матеріалів є мікроармовані бетони. У таких матеріалах сполучаються матриця, що має високу міцність на стиск, і волокно, що характеризується значним опором розриву і високим модулем пружності.

Вивчення вихідних характеристик різних видів волокон дасть змогу підібрати найбільш ефективні компоненти для мікроармування дрібнозернистих цементобетонів з точки зору співвідношення міцнісних характеристик і низької вартості запроєктованого конструкційного матеріалу.

З метою вибору компонента для мікроармування цементобетону було проаналізовано техніко-експлуатаційні показники основних видів волокон, які



використовуються тепер у будівельній галузі (табл. 1). Це дало змогу ранжувати існуючі армуючі волокна за ефективністю їх

використання для отримання мікроармованих дрібнозернистих бетонів із заданими характеристиками.

Таблиця 1

## Властивості різних видів волокон

Вид волокон	Щільність, кг/см <sup>3</sup>	Міцність на розтяг, МПа	Модуль пружності, МПа	Подовження при розриві, %
Поліпропіленові	900	400...800	3500...8000	8...25
Поліетиленові	950	700	1400...3200	10
Нейлонові	1 100	770...900	4000	14...19
Акрилові	1200	210...420	2100	25...45
Поліефірні	1400	730...780	8400	11...13
Целюлозні	1200	300...500	10000	0,5...4
Азбестові	2600	1200...3100	160000	0,5...1
Скляні	2600	1050...3850	7000...8000	1,5...3,5
Сталеві	7800	600...3150	200000	2...4
Вуглецеві	2000	2000	245000	1
Карбонові	1630	7800	380000	2,1
Поліамідні	900	720	1900	24
Віскозні	1200	660	5600	14
Базальтові	2700	1 600...3600	7000...11000	1,4...3,6

Як видно з табл. 1, базальтоне волокно за багатьма характеристиками перевершує інші фібри. Зокрема, базальтоне волокно за міцністю перевершує сталь. При цьому відносно подовження при розриві базальтоневої фібри нижче, ніж сталеві. Крім того, базальтоне волокно характеризується хімічною спорідненістю з цементним каменем. Усе це в сукупності дає змогу цій фібри більш ефективно перешкоджати утворенню мікротріщин у бетоні при його навантаженні.

Аналіз характеристик волокон, наведених у табл. 1, дає змогу зробити висновок про перспективність використання базальтоневого волокна як армуючого компонента під час проектування будівельних композитів.

Для відбору базальтоневого волокна, найбільш придатного для армування цементної матриці, з огляду на широту

географії застосування волокна в будівельній галузі та постійно зростаючі обсяги будівництва доріг на території України, проаналізовано волокна найбільших виробників базальтоневої фібри.

Зважаючи на безліч вихідних властивостей, для більш точного вибору базальтоневого волокна було проаналізовано сировинний склад, співвідношення геометричних характеристик (довжини і діаметра) фібри, а також способи його виробництва (табл. 2).

Одним з важливих вихідних показників волокна є його склад. Для підвищення адгезії до цементного каменю необхідно, щоб волокно характеризувалося силікатним складом, оскільки бетон має лужне середовище.

Елементний склад базальтоневого волокна (табл. 3) різних виробників характеризується незначними варіаціями елементів.

Таблиця 2

## Властивості базальтових волокон різних виробників

Компанія	Технологія	Сировина	Діаметр, мкм
Технобазальт – Івест ТОВ	Відцентрове диспергування	Базальт (SiO <sub>2</sub> – 53 %)	13...20
Завод будівельних матеріалів та базальтових виробів, ТОВ	Роздув розплаву вертикальним струменем повітря	Підшихтовий базальт (SiO <sub>2</sub> – 49 %)	3...5
BASALT FIBER & COMPOSITE MATERIALS, ТОВ	Дуплекс процес	Базальт (SiO <sub>2</sub> – 53 %)	1...3
Армбуд, ТОВ	Відцентрове диспергування	Базальт (SiO <sub>2</sub> – 52 %)	1...3

Таблиця 3

## Склад базальтового волокна

Компонент	Технобазальт – Івест ТОВ	Завод будівельних матеріалів та базальтових виробів, ТОВ	BASALT FIBER & COMPOSITE MATERIALS, ТОВ	Армбуд, ТОВ
	Волокно № 1	Волокно № 2	Волокно № 3	Волокно № 4
1	2	3	4	5
Na	1,87	3,6	2,3	1,62
Mg	3,07	1,8	1,8	2,52
Al	5,331	6,4	6,9	5,41
Si	19,43	18,4	19,2	18,03
P	0	0,2	0,2	0,23
K	0,33	0,6	0,5	0,59
1	2	3	4	5
Ca	3, i	3,2	2,9	3,23
Ti	0,69	0,5	0,5	0,44
Mn	0	0,1	0	0
Fe	3,64	4,2	3,5	7,05
O	62,19	61	62,2	60,75
S	0,46	0	0	0,03

Про стійкість базальтових волокон в агресивних середовищах можна судити за хімічним складом сировини, з якого воно витягнуто. Наприклад, лугостійкість підвищується при введенні до їх складу ущільнюючих структуру оксидів – цирконію, алюмінію, заліза, олова та ін. На стійкість волокон істотно впливає також технологія і спосіб виробництва.

Усе це в сукупності може визначати можливі субмікронні неоднорідності, пов'язані з різним вмістом Fe<sup>+2</sup> / Fe<sup>+3</sup> у волокні, що, на думку ряду дослідників [11, 12], визначає можливі субмікронні неоднорідності, пов'язані з наявністю заліза поза кремній-кисневою сіткою, що у свою чергу робить волокна нестійкими до окислення, а

також може призвести до кристалізації при підвищених температурах.

Як було зазначено раніше, при проєктуванні мікроармованих матеріалів мають значення також геометричні характеристики волокна. За літературними даними відомо, що для досягнення оптимального пластично-агрегатного стану мікроармуючого компонента в суміші слід відбирати вихідні компоненти з оптимальним співвідношенням довжини до діаметра більше 10 [13–15]. Фібра виробництва ТОВ

Армбуд характеризується необхідним співвідношенням геометричних характеристик.

Як агресивне середовище використовувалося цементне молочко, що характеризується достатньо лужним середовищем ( $\text{pH} = 12,9$ ). У зазначений розчин вводили розпушене волокно (рис. 1). Концентрацію базальтового волокна в розчині вибирали з урахуванням граничного вмісту фібри в цементних композитах (3...12 % від маси в'язучого), встановленого на підставі літературних даних. Концентрація становила 7 %.

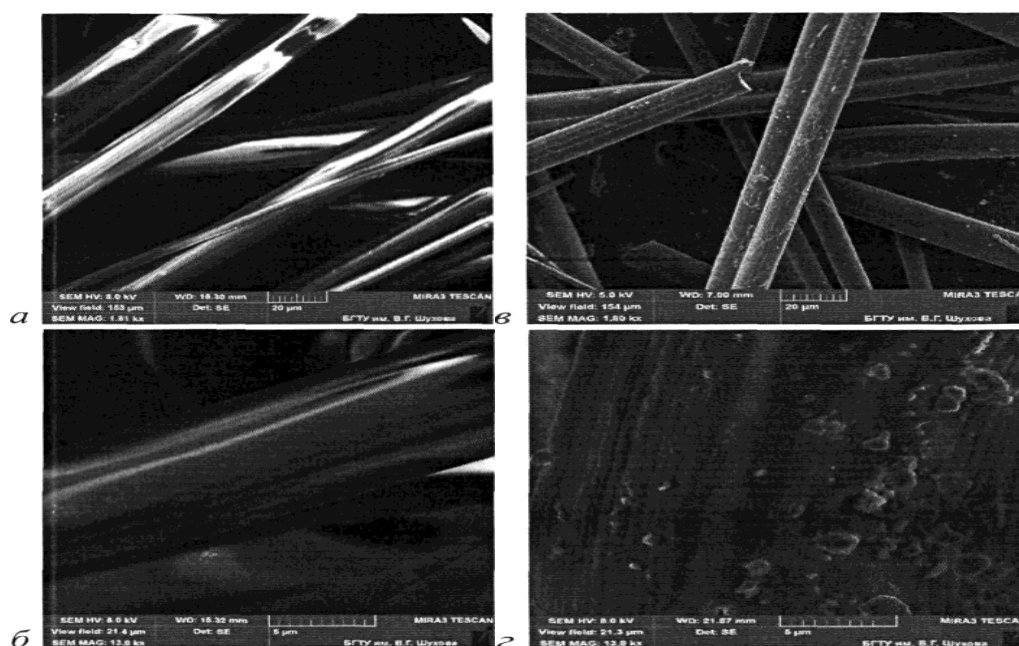


Рис. 1. Мікроструктура базальтового волокна:

а, б – в початковому стані; в, г – витримане в лужному середовищі протягом 28 діб

Зразки піддали витримці при кімнатній температурі протягом 7, 14, 28, 72 діб. Після закінчення терміну витримки для видалення залишків цементної складової волокна промивали слабким розчином соляної кислоти (0,1 %) через фільтрувальний папір. Для видалення сторонніх домішок надалі зразок промивали 1 л дистильованої води. Далі базальтове волокно просушували при кімнатній температурі. Розчинність волокна визначали за різницею мас до

експерименту та після, як сухий залишок у результаті витримки в лужному середовищі. Втрату маси виражали у відсотках (табл. 4). Можливі втрати волокна при промиванні (технологічні втрати), прийняті порівнянними для кожного експерименту.

У процесі спостереження на сьому добу на поверхні волокон виявилось незначне випадання білого осаду, ймовірно, пов'язане з кристалізацією  $\text{CaO}$  на ороговілій поверхні базальту.

У період з 14-ї до 28-ї доби в результаті стоншення більш дрібних ворсинок волокна загальна маса базальтового волокна поступово розсипалася з повільним осадженням дрібних частинок волокна (до 20 %). На 28-му добу кількість білого осаду

зросла і покривала собою все більше волокон. При огляді зразка на 72-гу добу виявлено зміну кольору поверхні волокна від слабо освітленого для малих ворсинок та до сірого для більших волокон.

Таблиця 4

Результати дослідження лужної стійкості базальтового волокна

№ з/п	Час випробування, доб	Маса волокна до експерименту, г	pH вихідне	Маса після витримки, г	Втрати маси, %	pH після експерименту	Колір
1	7	4,9	11,9	4,2	14,3	11,9	Нормальний
2	14	5,2	11,9	3,6	30,7	11,5	Нормальний
3	28	5,0	11,9	3,4	32,0	11,4	Слабо освітлений
4	72	5,1	11,9	2,1	58,8	11,3	Освітлений

Установлено, що зміна pH цементного розчину істотно залежить від часу перебування в ньому зразків волокна. Так, на 7-му добу приріст pH не було зафіксовано, на 14-ту – відзначено зменшення на 2 % і в період з 28-ї до 72-ї доби досяг зменшення на 4,3 % щодо вихідного.

Після 28 діб витримки в розчині втрата маси становить близько 32 %. Тривале зберігання фібри (72 доби) в розчині призводить до втрати маси до 59 %.

Викладені факти узгоджуються з результатами мікроструктурних досліджень базальтових волокон (рис. 1). Спостерігається значне вилугування вихідних алюмосилікатних матеріалів після витримання протягом 28 діб у лужному середовищі цементного молочка. Це сприяє появі на поверхні характерних слідів корозії (рис. 1, в, г), що негативно позначається на армуючій функції анізотропного компонента цементної матриці.

При експлуатації базальтової фібри в реальних умовах у бетоні ступінь розчинення волокна не буде настільки значною, оскільки процеси розчинення будуть затухати в міру тужавлення і твердіння цементного каменю. Проте не можна недооцінювати хімічні процеси, що

протікають у бетоні в період його експлуатації, у яких бере участь волокно. У зв'язку з цим необхідне розроблення способу модифікації волокна для підвищення його стійкості в агресивному лужному середовищі.

#### Висновки

1. Аналіз основних волокон, використовуваних тепер при отриманні будівельних матеріалів як мікроармуючого компонента, за рядом варіативних критеріїв дав змогу виділити базальтове волокно як найбільш раціональне з точки зору його використання при отриманні дрібнозернистих мікроармованих цементобетонів, зокрема для дорожнього будівництва. Порівняльний аналіз волокон чотирьох виробників за сукупністю показників: геометрії, хімічного складу, фізико-механічних характеристик, дав змогу виділити волокна ТОВ Армбуд, яке найбільше відповідає вимогам, що висуваються.

2. Установлено, що базальтове волокно в процесі витримання в агресивному і лужному середовищі з pH, відповідним гідратації цементного каменю, піддається істотному розчиненню. Водночас через 28 діб витримки в розчині лугу втрата маси становить близько 30 %.

Тривале зберігання фібри (72 доби) в розчині призводить до втрати маси до 59 %. Стає очевидним необхідність розроблення

способу підвищення лугостійкості базальтового волокна для збільшення його довговічності.

### Список використаних джерел

1. Ключев С. В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства. *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 8. С.61–68.
2. Ray В. С. A review on mechanical behavior of FRP composites at different loading speeds. *Critical reviews in solid state and materials sciences*. 2015. Vol. 40. P. 119–135.
3. Hornbostel K., Larsen С. K., Geiker M. R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate a literature review. *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 39. P. 60–72.
4. Дорошенко О. Ю., Дорошенко Ю. М. Дисперсно-армований бетон – надійний та ефективний матеріал для транспортного будівництва (продовження). *Транспортное строительство Украины*. 2011. № 5. С. 16–20.
5. Bentz D. P., Snyder K. A., Ahmed A. Anticipating the setting time of high-volume fly ash concretes using electrical measurements: feasibility studies using pastes. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 27. 2015.
6. Ren W. Dynamic compressive behavior of basalt fiber reinforced concrete after exposure to elevated temperatures. *Fire and materials*. 2015.
7. Lim Y.-C., Noguchi T., Cho C.-G. A quantitative analysis of the geometric effects of reinforcement in concrete resistivity measurement above reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 83. P. 189–193.
8. Свойства базальтового волокна и его применение в строительстве. *Строительные конструкции и материалы*. Москва, 2012. Вып. № 1. С. 14–17.
9. Химические процессы при термообработке базальтового волокна / А. В. Кнотько, А. В. Гаршев, И. Е. Давыдова и др. *Коррозия: материалы, защита*. 2017. N 3. С. 37–42.
10. Sonoda Y. Elastic Plastic Impact Response of Beam Element Subjected to Low Velocity Impact Load using SPH Method. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*. 2012. Vol. 68. P. 373–381.
11. Третьяков Ю. Д. Разработка химических методов повышения гидролитической и термической коррозионной стойкости базальтовых стекол. Отчет отделения химии и наук о материалах РАН. Москва, 2011.
12. Vishal Pandurang Kumbhar Basalt Rock Fibers–New Construction Material. *Acta Engineering International*. 2014. №2 (1). P. 11–18.
13. Gupta R., Biparva A. Innovative test technique to evaluate ‘self-sealing’ of concrete. *Journal of Testing and Evaluation*. 2015. Vol. 43. P. 1091–1098.
14. Brühwiler E. «Structural UHPFRC» to enhance bridges. *2-nd International Conference on UHPC Materials and Structures (UHPC 2018 – China)*. Fuzhou, China, 2018. P. 140–158.
15. Cihan M. T. Response surfaces for compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. № 40. P. 763–774.

---

Дорошенко Олександра Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Тел.: (067)758-57-33. E-mail: sane4kador@gmail.com.

Doroshenko Aleksandra, PhD (Tech.), Associate Professor, department of railway track and track economy State University of Infrastructure and Technology. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Tel.: (067)758-57-33. E-mail: sane4kador@gmail.com.

Статтю прийнято 29.09.2021 р.

УДК 666.9; 677.522

## ОТРИМАННЯ ДЕКОРАТИВНИХ ЛУЖНО-АКТИВОВАНИХ ЦЕМЕНТІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ШЛАКІВ З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ОКСИДІВ ЗАЛІЗА

Доктори техн. наук П. В. Кривенко, І. І. Руденко, канд. техн. наук О. Г. Гелевера, асп. Н. В. Рогозіна

## OBTAINING DECORATIVE ALKALINE-ACTIVATED CEMENT BY USING SLAGS WITH A HIGH CONTENT OF IRON OXIDE

D. Sc. (Tech.) P. V. Krivenko, D. Sc. (Tech.) I. I. Rudenko, PhD (Tech.) O. G. Gelevera, postgraduate student N. V. Rogozina

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256531>

---

**Анотація.** Декоративні цементи завжди мали великий попит у будівельній індустрії і потреба в них та вимоги до їхніх експлуатаційних властивостей постійно зростають. Але декоративні цементи на основі білого клінкерного портландцементу мають ті самі недоліки, що й традиційний портландцемент, а саме: високу енергоємність, низьку екологічність, високу ціну. Далеко не всі країни його виробляють і змушені імпортувати, що ще більше підвищує його вартість. Білі клінкерні цементи не завжди належною мірою можуть забезпечити достатність та стабільність декоративних і експлуатаційних характеристик матеріалів на їх основі. Тому як ефективна альтернатива може виступати лужно-активованим шлаковий цемент, який отримують з використанням промислових відходів і на основі якого може бути виготовлено білий цемент. Пігментований цемент має високу міцність, стійкість і широкий діапазон кольорів та відтінків, високу адгезію до різних основ, довговічність. Перешкодою до широкого використання лужно-активованих шлакових цементів як декоративних з високими характеристиками білості ( $\geq 70\%$ ) є нестабільний хімічний склад шлаку і насамперед різна наявність у ньому оксидів заліза. У статті показана можливість ефективного регулювання білості лужно-активованого цементу на рівні не нижче ніж  $70\%$  незалежно від кількості вмісту у ньому оксиду заліза шляхом використання отриманих у ході досліджень математичних залежностей. Показана можливість отримання пігментованих декоративних цементів класу 42,5R. Досліджено їхній фазовий склад, калориметричні та експлуатаційні характеристики.

**Ключові слова:** декоративні лужно-активовані цементи, оксиди заліза, ступінь білості.

**Abstract.** Decorative cements have always been in high demand in the construction industry and the demand for them and the requirements for their performance are constantly growing. But decorative cements based on white clinker Portland cement have the same disadvantages as traditional Portland cement, namely: high energy intensity, low environmental friendliness, high price. Not all countries produce it and have to import it, which further increases its cost. White clinker cements do not always provide sufficient stability of decorative and operational characteristics of materials based on them. Therefore, an alkali-activated slag cement, obtained using industrial waste, and on the basis of which white cement can be obtained, can act as an effective alternative. Pigmented alkali-activated decorative cement has high strength, durability and a wide range of colors and shades, high adhesion to various substrates, durability. An obstacle to the widespread use of alkali-activated slag cements as decorative ones with high whiteness characteristics ( $\geq 70\%$ ) is the unstable chemical composition of the slags and, first of all, the different presence of iron oxides in it. In this work, the optimization of the compositions of alkali-activated slag decorative cements according to

*the criterion of whiteness, depending on the amount of iron oxide in the slag, is carried out. Phase analysis of decorative alkali-activated cements was carried out. It was found that the composition of hydrated neoplasms is represented mainly by low-basic calcium hydrosilicates, hydroaluminosilicate phases of an alkaline and alkaline-alkaline earth composition, and gel-like products. Mathematical dependencies have been obtained that make it possible to easily and quickly calculate the amount and type of bleaching additive, taking into account the presence of iron oxide in the slag in the range of 0,4...2,6 %, while ensuring the whiteness of the cement stone at least 70 %. The possibility of obtaining pigmented cements of grades / class M400...M500 / 42,5R is shown. The heat release of decorative alkali-activated cements, depending on their composition, is 44,0...77,4 J/g and is at the level of heat release of Portland cements 32,5R...42,5R.*

**Keywords:** decorative alkaline-activated cements, iron oxides, degree of whiteness.

**Вступ.** Розвиток промисловості і політика безпеки вимагають нових будівельних матеріалів, які мають бути економічними й екологічно безпечними. Зокрема це стосується і декоративних цементів, які застосовуються для підвищення архітектурної виразності будівель та виконання опоряджувальних робіт. Вимоги до їхніх експлуатаційних властивостей та потреба в них постійно зростають [1]. Декоративні цементи, як правило, виготовляють на основі білих цементів [2]. Однак такі цементи мають усі недоліки портландцементу, включно з високою енергетичною потребою, високою вартістю і низькою екологічністю при їх виробництві. Білі портландцементи потрібно імпортувати. Білі клінкерні цементи не завжди достатньою мірою можуть забезпечити стабільність декоративних і експлуатаційних характеристик матеріалів на їх основі [3–5]. Ефективною альтернативою може бути шлаколушний цемент, одержуваний на основі промислових металургійних та хімічних відходів. Він також здатен забезпечити ряд спеціальних властивостей – високу міцність, високу адгезію, довговічність та ін. [6–10].

Але серйозною перешкодою для широкого використання лужно-активованих шлакових цементів як декоративних з високими характеристиками білості ( $\geq 70\%$ ) є нестабільний хімічний склад шлаків.

Зокрема це стосується наявності в них оксидів заліза, вміст яких може коливатися від 0,13 до 2,95 %.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У виконаних раніше дослідженнях у цьому напрямку було недостатньо приділено уваги впливу окремих добавок і їх взаємодії на декоративні і фізико-механічні властивості лужно-активованих цементів. Не завжди враховувався вплив оксидів заліза у шлакові. Так, у [11] при отриманні шлаколушного декоративного цементу використано тільки один шлак з  $M_o = 0,91$ , хімічний склад якого не вказано і який не є характерним для України. Вплив оксидів заліза на білість цементів не розглядався. У [12] представлено багатокомпонентний декоративний цемент на основі римського цементу, модифікований лужними, вибілювальними, повітретягувальними і пластифікуючими добавками. І хоча у складі цього цементу кількість оксидів заліза становила 0,64...2,75 %, їх вплив на декоративні властивості не визначався. Крім того, їх міцність у віці 28 діб становила 21,5...27,5 МПа, що обмежує їх використання отриманням декоративних штукатурних сумішей, але не бетонів. У роботі [13] показано, що оксиди заліза мають значний вплив на білість лужно-активованого цементу, але не вказані шляхи управління білістю цементів при використанні шлаків з різною кількістю оксидів заліза. У роботах [14–16] розглянуто можливість використання «хвостів» залізної руди як пігментів для отримання декоративних клінкерних цементів, а в [17] «червоний шлам» використовувався як

наповнювач і пігмент для клінкерних цементів. У [18–20] розглядалось використання  $CaCO_3$  у в'язучих системах, зокрема і в лужно-активованих, але не як вибілювача, а як наповнювача. Таким чином, слід зазначити, що інформації щодо розроблення закордонними фахівцями декоративних цементів саме на основі лужно-активованих шлакових в'язучих систем взагалі не виявлено, що вказує на можливу ексклюзивність цієї вітчизняної розробки.

Інформація, подана у цій статті, є продовженням досліджень, розпочатих у [21].

**Метою** цієї роботи є оптимізація складів лужно-активованих шлакових декоративних цементів з урахуванням вмісту у шлаках оксидів заліза, а також дослідження їхніх основних фізико-механічних і експлуатаційних властивостей.

Для досягнення сформульованої мети потрібно було вирішити такі **завдання**:

– виконати оптимізацію складів декоративних лужно-активованих цементів за критерієм білості залежно від кількості оксиду заліза у шлаку з використанням математичних планів повного факторного експерименту;

– визначити основні фізико-механічні та експлуатаційні характеристики отриманих цементів;

– визначити калориметричні характеристики отриманих цементів.

#### **Основна частина дослідження**

##### **Сировинні матеріали і методики.**

У дослідженнях було використано доменний гранульований шлак. Хімічний склад шлаку наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Склад доменного гранульованого шлаку

Шлак	Вміст оксидів, % мас.										M <sub>0</sub>
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	SO <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	в.п.п.	Σ	
Дніпро-дзержинський	37,90	6,85	45,35	5,21	0,35	2,6	0,11	0,31	1,34	100,02	1,13

Ступінь помелу шлаку становила 4414 см<sup>2</sup>/г за Блейном. Шлак подрібнювався у млині з алубітовими (високоглиноземистими) мелючими тілами і футеровкою.

Як лужний компонент було використано негіроскопічний метасилікат натрію пентагідрат ( $Na_2O \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$ ) у вигляді порошку у кількості 10 %.

Як вибілювальні добавки використовували діоксид титану ( $TiO_2$ ), каолін класу КН 84, застосований у паперовій промисловості з білістю 84 %, і карбонат кальцію ( $CaCO_3$ ) у порошкоподібній формі з білістю 90 %. Використовувалися пігменти мінерального походження.

Приготування суміші виконувалося традиційним способом – замішуванням з водою в'язучої композиції «шлак + лужний компонент + добавки». Для виготовлення зразків-балочок 4×4×16 см складу 1:3 з

суміші нормальної консистенції використовувався стандартний пісок Гусарівського родовища Харківської області. Усі складові перемішувалися у стандартному лабораторному змішувачі типу Hobart.

Оптимізація складів виконувалася з використанням планів повного факторного експерименту типу 2<sup>3</sup>.

Технологічні та фізико-механічні властивості шлаколужних цементів визначалися відповідно до чинних в Україні державних стандартів.

Тепловиділення гідратованих цементних композицій визначалося ізотермічним (термосним) методом.

**Оптимізація складів цементів з урахуванням хімічного складу шлаків.** У цьому експерименті базові білі склади лужно-активованих шлакових цементів з добавками вибілювачів підбиралися таким



чином, щоб забезпечити білість не меншу ніж 70 %. Достатній рівень білості дає змогу у подальшому отримувати чистіші кольори і відтінки при пігментації цементу. Було встановлено, що використання 5 %  $TiO_2$ , 15 % каоліну або 24 %  $CaCO_3$  забезпечують білість лужно-активованого шлакового цементу у межах 70...73 % при використанні шлаку, наведеного у табл. 1.

Раніше [21] зазначалося, що білість декоративних лужно-активованих шлакових цементів істотно залежить від складу доменних гранульованих шлаків, які використовуються, і насамперед від вмісту в

них оксидів заліза. А це буде впливати на їхню білість і кількість необхідних вибілювальних добавок, які корегують мінімально допустиму білість цементів до рівня не менше 70%.

Тому у даній роботі були виконані дослідження щодо коригування кількості різних вибілюючих добавок залежно від складу шлаку і вмісту у ньому оксидів заліза. Оптимізація складів виконувалася з використанням планів повного факторного експерименту типу  $2^3$ . Фактори, межі їх зміни і результати досліджень наведено у табл. 2, 3 і на рис. 1.

Таблиця 2

Вихідні дані

Фактор	Одиниця виміру	Код фактора	Рівні варіювання факторів		
			-1	0	+1
Вміст $FeO$	%	X1	0,4	1,5	2,6
Вміст $TiO_2$	%	X2	0	5	10
Вміст каоліну	%	X2	0	7,5	15
Вміст $CaCO_3$	%	X2	0	12	24

Таблиця 3

Матриця повних факторних експериментів ПФЕ- $2^3$

№ з/п	План у кодах		План у натуральних величинах		Білість, %	План у натуральних величинах		Білість, %	План у натуральних величинах		Білість, %
	X1	X2	$FeO$	$TiO_2$		$FeO$	каолін		$FeO$	$CaCO_3$	
1	+	+	2,6	10	73,6	2,6	15	60,0	2,6	24	57,4
2	+	-	2,6	0	52,8	2,6	0	52,0	2,6	0	51,9
3	-	+	0,4	10	86,5	0,4	15	73,1	0,4	24	70,6
4	-	-	0,4	0	64,6	0,4	0	65,1	0,4	0	65,1
5	+	0	2,6	5	61,6	2,6	7,5	56,0	2,6	12	54,7
6	-	0	0,4	5	73,9	0,4	7,5	69,2	0,4	12	67,8
7	0	+	1,5	10	80,9	1,5	15	67,8	1,5	24	65,5
8	0	-	1,5	0	59,6	1,5	0	59,8	1,5	0	60,0
9	0	0	1,5	5	68,6	1,5	7,5	63,8	1,5	12	62,7

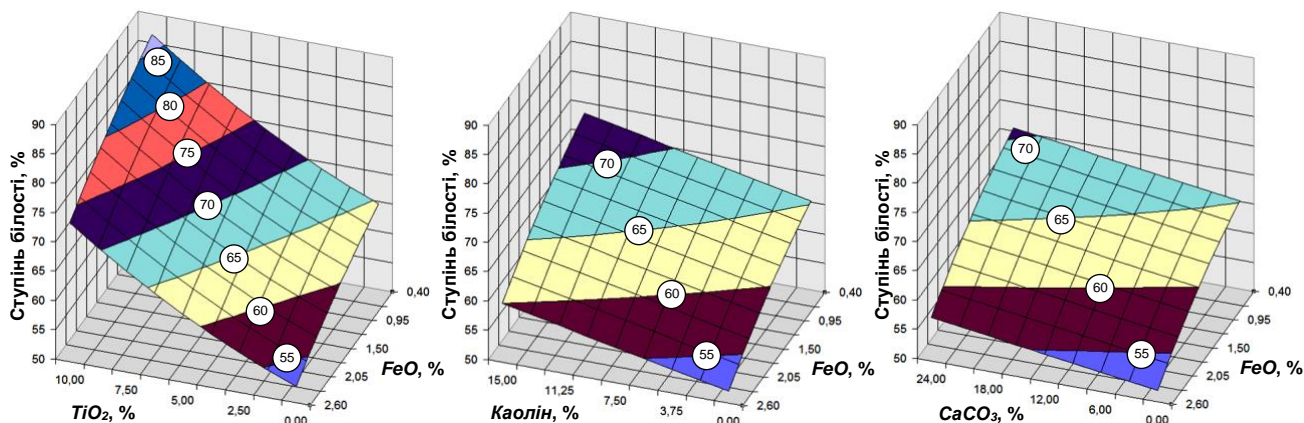


Рис. 1. Залежність ступеня білості лужно-активованих шлакових декоративних цементів від типу вибілювальної добавки і вмісту оксиду заліза у шлаку

У результаті апроксимації даних отримані рівняння регресії, які адекватно відображають результати експерименту:

$$B (FeO-TiO_2) = 68,56 - 6,17 \cdot X_1 + 10,64 \cdot X_2 - 0,83 \cdot X_1^2 - 1,67 \cdot X_2^2 - 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (1)$$

$$B (FeO-каолін) = 63,83 - 6,58 \cdot X_1 + 4 \cdot X_2 \quad (2)$$

$$B (FeO-CaCO_3) = 62,72 - 6,58 \cdot X_1 + 2,75 \cdot X_2 - 1,48 \cdot X_1^2 + 0,02 \cdot X_2^2 \quad (3)$$

Як впливає з рис. 1, ступінь білості шлакових лужно-активованих цементів швидко зростала зі збільшенням вмісту діоксиду титану, тоді як додавання каолінової глини і  $CaCO_3$  давало змогу змінювати ступінь білості у більш вузьких межах.

У результаті регресійного аналізу отриманих рівнянь визначено значущість кожного з коефіцієнтів рівняння, тобто вплив кожного з факторів на ступінь білості цементу. Результати наведено на рис. 2.

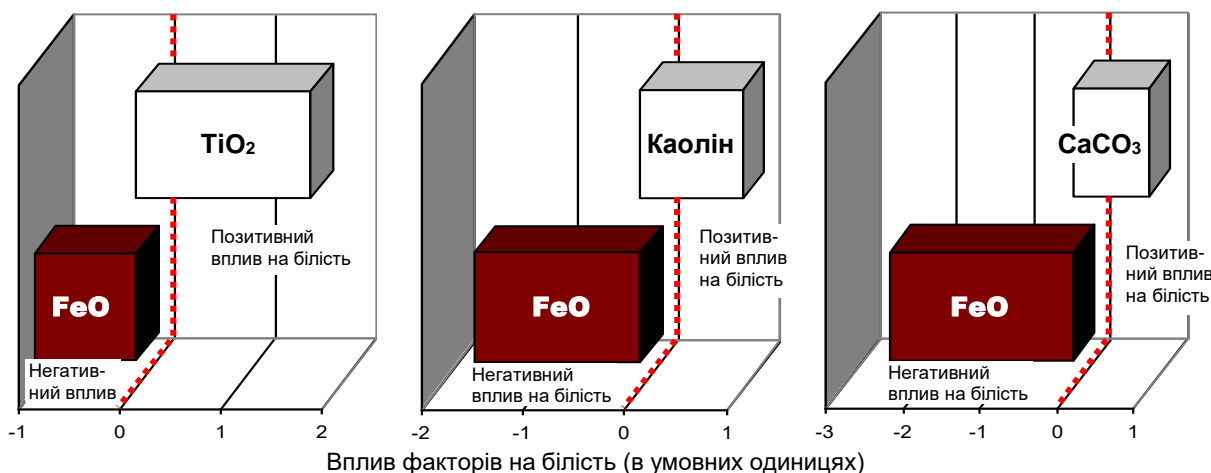


Рис. 2. Ступінь впливу різних факторів (вибілювачів) на білість лужно-активованих декоративних шлакових цементів

Як видно з рис. 2, ступінь позитивного впливу  $TiO_2$  на білість значно перевищує негативний вплив оксиду заліза. Однак у разі використання добавок каоліну і кальциту їх ступінь позитивного впливу поступається негативному впливу оксиду заліза, що знижує їх ефективність як вибілювачів порівняно з  $TiO_2$ .

Використовуючи рівняння (1)–(3), можна розрахувати необхідну кількість вибілювальних добавок при кількості оксиду заліза в шлаках у межах факторного простору експерименту, тобто у діапазоні 0,4...2,6 %. Результат такого розрахунку наведено на рис. 3.

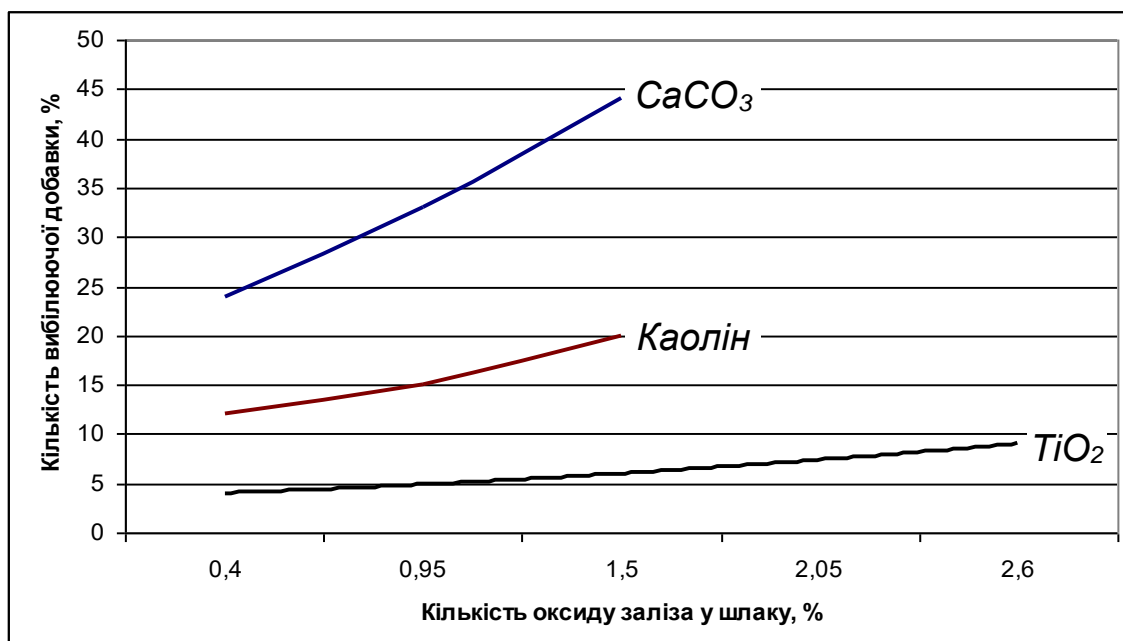


Рис. 3. Кількість вибілювальних добавок, що забезпечує білість 70...72 % залежно від вмісту оксиду заліза у шлаку

Введення добавок у підвищеній кількості може істотно погіршити фізико-механічні та експлуатаційні характеристики цементів. Згідно з [22] введення 10...15 % каоліну призводить до деякого зниження міцності. Згідно з [20] допускається вводити до 40 % дрібнодисперсного  $CaCO_3$  навіть у портландцемент без істотної втрати міцності. Втрату міцності в лужно-активованих шлакових цементах можна частково компенсувати за рахунок введення 2...3 % добавки портландцементу М500 або портландцементного клінкеру. Однак введення у лужно-активовані декоративні цементи більше 20 % каоліну і більш ніж 45 % кальциту у будь-якому разі небажано. За наявності шлаку з високим вмістом

оксиду заліза (2 % і вище) для вибілювання слід використовувати добавку  $TiO_2$  або її комбінацію з іншими вибілювальними добавками.

**Фізико-механічні властивості декоративних лужних цементів.** Після оптимізації декоративних цементів за критерієм білості до них було введено мінеральний пігмент червоно-коричневого кольору у кількості 5 % і перевірено основні фізико-механічні характеристики. Результати подано у табл. 4.

Як видно з табл. 4, отримані лужно-активовані декоративні пігментовані цементі за міцністю відповідають класу 42,5R.

Таблиця 4

## Фізико-механічні характеристики декоративних пігментованих цементів

№ з/П	Склад цементу, % мас.						В/Ц	Роз-плив, мм	Міцність, $R_{ст}/R_{зг}$ , МПа, через, доб			
	шлак	$TiO_2$	каолін	$CaCO_3$	м/с	піг-мент			2	7	28	90
1	90	–	–	–	10	–	0,28	114	<u>32,8</u> 5,4	<u>43,9</u> 7,5	<u>50,6</u> 10,4	<u>57,8</u> 8,0
2	80	5	–	–	10	5	0,30	118	<u>29,8</u> 4,9	<u>38,4</u> 9,1	<u>48,8</u> 6,3	<u>55,0</u> 9,4
3	70	–	15	–	10	5	0,32	112	<u>24,4</u> 4,9	<u>32,8</u> 7,6	<u>47,2</u> 8,3	<u>48,8</u> 9,8
4	61	–	–	24	10	5	0,33	120	<u>25,1</u> 3,6	<u>33,1</u> 8,3	<u>43,1</u> 6,3	<u>46,3</u> 7,0

Примітка. м/с – метасилікат натрію пентагідрат.

**Стійкість до ультрафіолетового впливу і тепловологої обробки.** Стійкість кольору цементу до ультрафіолетового випромінювання і тепловологої обробки (ТВО) визначалась на зразках-коржах з цементного тіста нормальної густоти за ДСТУ Б В.2.7-185:2009. Було використано мінеральні пігменти. Склад тіста містив 70 % шлаку, 15 % каоліну, 10 % метасилікату і 5 % пігменту. ТНГ – 25 %.

Опромінення зразків ультрафіолетовими променями здійснювалося ртутно-кварцовою лампою потужністю  $(240 \pm 20)$  Вт

протягом 48 год. ТВО виконувалось за стандартним режимом 3+6+3 з температурою ізотермічного витримування 80...85 °С.

Стійкість кольору цементу визначалась візуально порівнянням кольору зразків-коржів, підданих тепловій обробці й ультрафіолетовому опроміненню, з кольором контрольних необроблених зразків-коржів.

Результати випробувань подано на рис. 4. Як видно з рисунку, колір зразків у результаті впливу UF-опромінювання і тепловологої обробки практично не змінився.

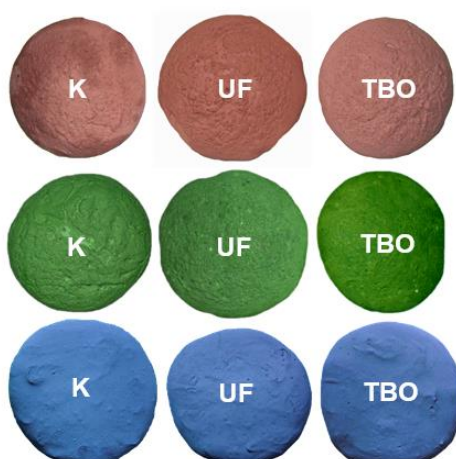


Рис. 4. Випробування декоративних пігментованих шлаколузних цементів на стійкість до ультрафіолетового випромінювання і тепловологої обробки: К – контрольні зразки; UF – зразки після ультрафіолетового опромінювання; ТВО – зразки після тепловологої обробки

**Тепловиділення.** На рис. 5 подано криві тепловиділення декоративних лужно-активованих шлакових цементів залежно від їх складу.

При замішуванні в'язучих композицій водою практично відразу починається тепловиділення, природа якого пов'язана з хемосорбційними процесами, розчиненням (диспергуванням) шлакового скла з утворенням лужних колоїдних золів, спонтанною їх коагуляцією і формуванням структури в'язучої системи.

Видно, що введення вибілювальних добавок знижує загальне тепловиділення в міру їх збільшення у в'язучій композиції і корелює з показниками міцності (табл. 4). Пік тепловиділення зміщується з 7...8 год (у композиціях без добавок) до 9...11 год (у

композиціях з добавками). Це відбувається насамперед за рахунок зменшення частки шлаку в композиції. Особливо це відчутно у складах з добавкою каоліну і кальциту.

Характерно, що загальне тепловиділення складу з кальцитом (55,1 Дж/г) істотно вище тепловиділення складу з каоліном (44,0 Дж/г), хоча добавки кальциту – 24 % суттєво більше, ніж добавки каоліну – 15 %. Можливо це пов'язано зі зв'язуванням частини луку каоліном і у зв'язку з цим деяким зниженням реакційності дисперсійного середовища.

Загальне тепловиділення складів з каоліном і кальцитом перебуває на рівні тепловиділення портландцементів марок М400...М500 (класу 32,5R...42,5R).

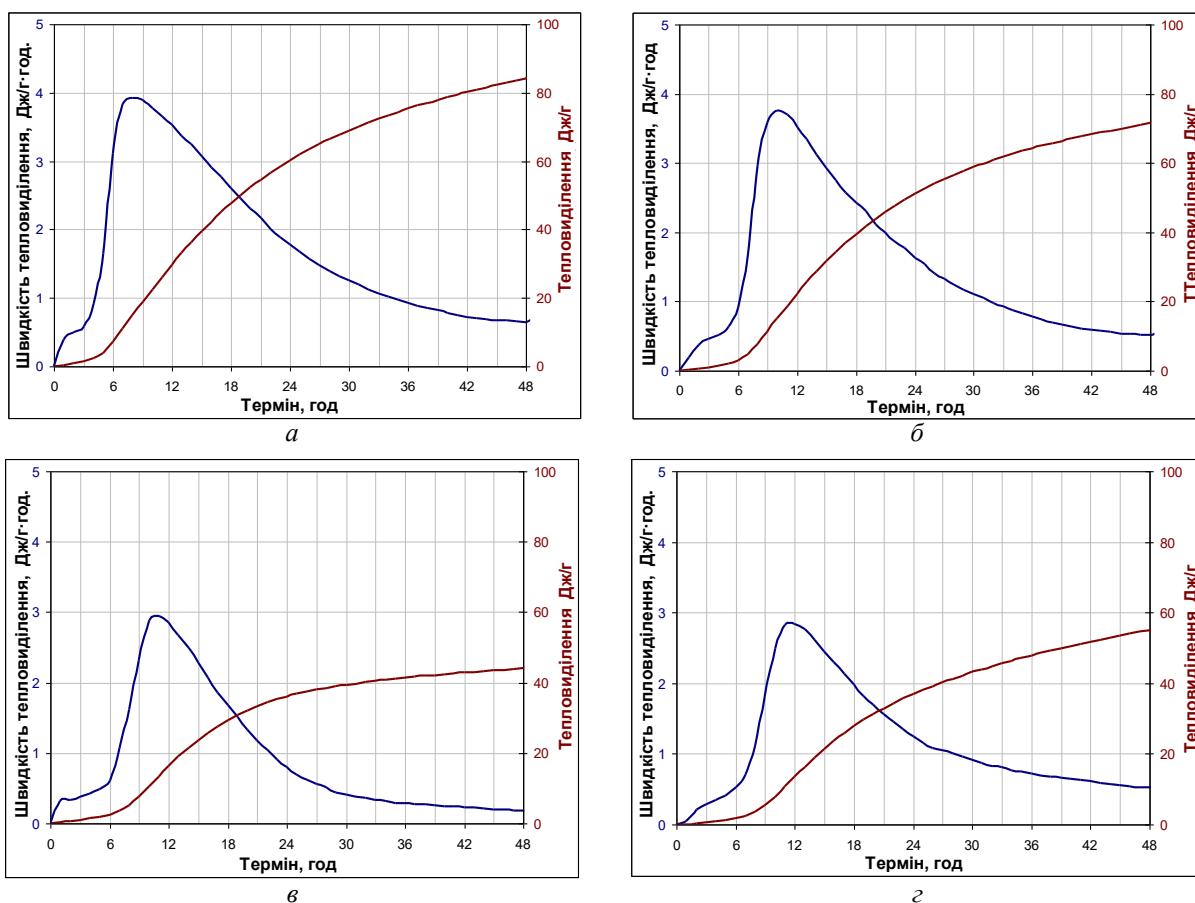


Рис. 5. Тепловиділення лужно-активованих декоративних цементів:  
 а – «шлак + метасилікат натрію» (без добавок); б – «шлак +  $TiO_2$  (5 %) + метасилікат натрію + пігмент (5 %)»;  
 в – «шлак + каолін (15 %) + метасилікат натрію + пігмент (5 %)»;  
 г – «шлак +  $CaCO_3$  (24 %) + метасилікат натрію + пігмент (5 %)»

**Висновки.** Виконано оптимізацію складів лужно-активованих шлакових декоративних цементів за критерієм білості залежно від кількості оксиду заліза у шлаку.

Отримано математичні залежності, які дають змогу легко підбирати вид і оперативно розраховувати кількість вибілювальної добавки з урахуванням наявності оксиду заліза у шлаку у межах 0,4...2,6 % із забезпеченням при цьому білості цементного каменю не нижче ніж 70 %.

Визначено міцнісні характеристики декоративних цементів, пігментованих мінеральною добавкою. Отримані пігментовані декоративні шлакові лужні цементні маюють клас міцності 42,5R.

Установлено, що в результаті дії ультрафіолету та тепловологої обробки на пігментовані зразки декоративних лужно-активованих шлакових цементів їх колір

практично не змінився порівняно з контрольними зразками.

Тепловиділення декоративних лужно-активованих цементів залежно від їх складу становить 44,0...77,4 Дж/г і перебуває на рівні тепловиділення портландцементів 32,5R...42,5R.

Подальші роботи будуть спрямовані на визначення експлуатаційних характеристик лужно-активованих шлакових декоративних складів – адгезії, висолотворення, водоутримуючої здатності, морозостійкості, довговічності.

#### Подяки

Автори висловлюють подяку Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку проекту (реєстраційний № 1020U001010), що виконується за рахунок бюджетного фінансування у 2021...2022 р.

#### Список використаних джерел

1. Семенов В. М. Лакокрасочные материалы для защиты бетонных и цементных поверхностей. *Лакокрасочная промышленность*. 2010. № 11. С. 23–27.
2. Білий цемент. Портал ПП Будпостач. URL: <https://pp-budpostach.com.ua/a118411-belyj-tsement.html>.
3. Березина Л. А., Абдулберов З. А. Применение каолина компании IMERYS Minerals в производстве лакокрасочных материалов. *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2009. Вып. 1–2. С. 61–65.
4. Левашова Ю. С., Косенко Н. О., Лебедєва О. С. Дослідження параметрів мікроклімату приміщень великого скупчення людей. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2019. Т. 93. № 3. С. 217–221.
5. Петренко Г. С. Современные пигменты и наполнители для лакокрасочной промышленности. *Лакокрасочная промышленность*. 2010. Вып. 9. С. 30–36.
6. Shi C., Krivenko P. V., Della Roy Alkaline activated cements and concretes (in Chinese, Authorized translation from English): Monograph. Taylor & Francis. 2012. 326 p.
7. Fernández-Jiménez A., Garcia-Lodeiro I., Maltseva O., Palomo A. Hydration mechanisms of hybrid cements as a function of the way of addition of chemicals. *Journal of the American Ceramic Society*. 2019. Vol. 102(1). P. 427–436.
8. Chaouche M., Gao X.X., Cyr M., Cotte M., Frouin L. On the origin of the blue/green color of blast-furnace slag-based materials: Sulfur K-edge XANES investigation. *J Am Ceram Soc*. 2017. Vol. 100. P. 1707–1716. DOI:10.1111/jace.14670.
9. Osama Sakr, Eisa Hekal, Hashem F.S., Faten Selim Mechanical Properties, Resistance to Fire and Durability for Sulfate Ions of Alkali activated Cement made from Blast furnace Slag-Fine Metakaolin *Egyptian Journal of Chemistry*, 2020, Vol. 63, P. 4821–4831. DOI:10.21608/ejchem.2020.28427.2612.

10. Bernal S. A., Rodríguez E. D., Mejía de Gutiérrez R. *et al.* Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. *J. Mater Sci.* 2011. Vol. 46. P. 5477–5486. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5490-z>.
11. Krivenko P., Petropavlsky O., Puskar V., Ostrovska L. Decorative alkaline cements *IV Intern. Symp: Non-Traditional cement & Concrete* (Brno), 2011. P. 257–265.
12. Kryvenko P., Sanytsky M., Kropyvnytska T., Kotiv R. Decorative multi-component Alkali Activated Cements for restoration and finishing works *Advanced Materials Research*. Trans. Tech. Publications, Switzerland. 2014. Vol. 897. P. 45–48. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.897.45.
13. Кривенко П. В., Ковальчук О. Ю. Управління декоративними властивостями лужних цементів. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2019. Т. 2, № 2(95). С. 280–285.
14. Luciano Fernandes de Magalhães, Sâmara França, Michelly dos Santos Oliveira, Ricardo André Fiorotti Peixoto, Sofia Araújo Lima Bessa, Augusto Cesar da Silva Bezerra Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 274(335):123260. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.123260.
15. José Lucas Barros Galvão, Humberto Dias Andrade, Guilherme Brigolini, Ricardo André Fiorotti Peixoto, Julia Castro Mendes Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 200, P. 412–422. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.07.313.
16. Wanna Fontes, Giovanni Gonçalves Fontes, Ellen Cristine Pinto Costa, Julia Castro Mendes, Guilherme Brigolini, Ricardo André Fiorotti Peixoto Iron ore tailings in the production of cement tiles: a value analysis on building sustainability *Ambiente Construído*. 2018. Vol. 18(4). P. 395–412. DOI:10.1590/s1678-86212018000400312.
17. Mansour Ghalehnovi, Naeim Roshan, Erfan Hakak, Elyas Asadi Shamsabadi, Jorge de Brito Effect of red mud (bauxite residue) as cement replacement on the properties of self-compacting concrete incorporating various fillers. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 240 : 118213. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118213.
18. Rashad A. M., Morsi W. M., Khafaga S. A. Effect of limestone powder on mechanical strength, durability and drying shrinkage of alkali-activated slag pastes. *Innov. Infrastruct. Solut.* 6. 2021. Vol. 127. URL: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00496-y>.
19. Borziak O. S., Plugin A. A., Chepurna S. M., Zavalniy O. V., Dudin O. A. The effect of added finely dispersed calcite on the corrosion resistance of cement compositions. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. 012080. DOI:10.1088/1757-899X/708/1/012080.
20. Chepurna S., Borziak O., Zubenko S. Concretes, Modified by the Addition of High-Diffused Chalk, for Small Architectural Forms. *MSF*. 2019. Vol. 968 : 82–88. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.82>.
21. Залежність декоративних шлаково-лужних цементів від хімічного складу доменних шлаків / П. В. Кривенко, А. Г. Гелевера, А. Ю. Ковальчук, Н. В. Рогозіна. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2021. № 83. С. 58–66. DOI: 10.31650/2415-377X-2021-83-58-66.
22. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Kovalchuk O. A comparative study on the influence of metakaolin and kaolin additives on properties and structure of the alkaliactivated slag cement and concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1*. 2018. Vol. 6(91) P. 33–39. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.119624>.

---

Кривенко Павло Васильович, доктор технічних наук, професор, директор НДІВМ Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID: 0000-0001-7697-2437. E-mail: [pavlo.kryvenko@gmail.com](mailto:pavlo.kryvenko@gmail.com).  
Руденко Ігор Ігорьович, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник НДІВМ Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID: 0000-0001-5716-8259. E-mail: [igor.i.rudenko@gmail.com](mailto:igor.i.rudenko@gmail.com).

---

Гелевера Олександр Григорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID: 0000-0002-6285-9780.

E-mail: a-gelevera@ukr.net.

Рогозіна Наталія Володимирівна, аспірант кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID: 0000-0001-9621-4246.

E-mail: knubatbkv@ukr.net.

Krivenko Pavlo, D. Sc. (Tech.), professor, Director of the Scientific Research Institute of Binders and Materials Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID: 0000-0001-7697-2437.

E-mail: pavlo.kryvenko@gmail.com.

Rudenko Igor, D. Sc. (Tech.), Leading Researcher of the Scientific Research Institute of Binders and Materials Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID: 0000-0001-5716-8259.

E-mail: igor.i.rudenko@gmail.com.

Gelevera Oleksandr, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Technology of Building Structures and Products Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID: 0000-0002-6285-9780.

E-mail: a-gelevera@ukr.net.

Rogozina Natalia, postgraduate student, Department of Technology of Building Structures and Products Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID: 0000-0001-9621-4246. E-mail: knubatbkv@ukr.net.

Статтю прийнято 12.10.2021 р.

УДК 624.012.25

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО АРМУВАННЯ РОЗТЯГНУТИХ ТА ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ЗАДАНОЮ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ

Кандидати техн. наук В. Є. Бабич, О. Є. Полянська, асп. І. В. Швець

### THE DETERMINATION OF PARAMETERS OF COMBINED REINFORCEMENT OF STRETCHED AND BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH THE SPECIFIC CRACK RESISTANCE

PhD (Tech.) V. Babich, PhD (Tech.) O. Polianovska, Postgraduate student I. Shvets

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256536>

---

*Анотація.* Для поліпшення експлуатаційних якостей залізобетонних конструкцій частіше почали використовувати їхнє комбіноване армування, яке поєднує одночасне армування традиційними сталевими стержнями та хаотично розташованою в масі бетону сталевую фіброю, але методика їх проектування досконало ще не розроблена. У статті наводиться методика встановлення параметрів дисперсного армування бетону, яка базується на отриманні рівнянь регресії для визначення зусиль у комбіновано армованих центральних розтягнутих та згинальних елементах перед утворенням тріщин, для чого виконуються числові математично плановані експерименти.

*Ключові слова:* комбіновано армовані елементи, тріщиностійкість, числовий експеримент, рівняння регресії, параметри дисперсного армування.

*Abstract.* Recently, there has been an increase in the use of reinforced concrete structures with combined reinforcement in construction, which makes it possible to increase the resistance of such structures to deformation and cracking. Dispersed reinforced concrete was used to cover roads,



flooring in industrial buildings, the manufacture of curbs and more. For the construction of public and industrial buildings, the use of combined reinforced structures has not been widely used, as no perfect method of their calculation has been developed.

Combined reinforcement structures include concrete structures that are reinforced with steel rods and steel fiber, which is randomly arranged in the mass of concrete. The strength of reinforced concrete depends on such factors as: the strength of concrete, reinforcement with rod reinforcement, the type of fiber and its characteristics, the volume of fiber per unit volume of concrete, the size of the cross section of the elements. These factors affect the tensile strength of reinforced concrete both directly and by their interaction. Therefore, determining the effective parameters of dispersed concrete reinforcement is a complex multivariate task, its solution is proposed to be achieved by performing mathematically planned experiments.

When choosing the parameters of dispersed reinforcement of centrally stretched and bending reinforced concrete elements (lower truss belt, arch tightening, cylindrical tank wall, beams, slabs), it is advisable to choose the strength of concrete  $f_{ck}$ , fiber length  $l_f$  and volume dispersion coefficient. The optimal choice of values of these parameters is proposed to be performed using quadratic regression equations, which are based on the results of three-factor three-level mathematically planned experiments, which are based on the matrix of the Box-Behnken plan.

The obtained mathematical models make it possible to analyze the influence of disperse reinforcement parameters on crack formation forces in combined reinforced concrete elements and to determine their optimal values. The use of combined reinforcement allows increasing the crack resistance of reinforced concrete elements in two or more times.

**Keywords:** combined reinforced elements, crack resistance, numerical experiment, regression equation, disperse reinforcement parameters.

**Вступ.** Залізобетонним конструкціям притаманні суттєві недоліки, що пов'язані з виникненням тріщин у розтягнутих зонах, які можуть утруднювати їх нормальну експлуатацію. Крім цього, до багатьох конструкцій за умовами експлуатації ставляться вимоги недопущення утворення тріщин у бетоні, щоб не знизити їхню довговічність. Досягти збільшення опору бетону розтягнутої зони в залізобетонних конструкціях можна підвищенням класу бетону або застосуванням високоміцної попередньо напруженої арматури, що спричиняє додаткові матеріальні та енергетичні витрати.

Останнім часом спостерігається збільшення об'ємів використання в будівництві залізобетонних конструкцій з комбінованим армуванням, що дає можливість підвищити опір таких конструкцій деформуванню та утворенню тріщин. До конструкцій з комбінованим армуванням належать конструкції з бетону, які армовані сталевими поздовжніми

стержнями та сталевую фібру, що хаотично розташована в масі бетону. Міцність сталевібробетону залежить від таких факторів, як: міцність бетону, армування стержневою арматурою, вид фібри і її характеристик, об'єм фібри в одиниці об'єму бетону, розміри поперечного перерізу елементів. Ці фактори впливають на міцність сталевібробетону при розтягу як безпосередньо, так і своєю взаємодією, а тому визначення ефективних параметрів дисперсного армування бетону є складною багатоваріантною задачею.

Дисперсно армований бетон використовується переважно для покриття автодоріг, улаштування підлог у промислових будівлях, виготовлення бордюрів, а зараз і для захисних плит фортифікаційних споруд. Для зведення громадських і промислових будівель застосування комбіновано армованих конструкцій не набуло широкого використання, оскільки не розроблена досконала методика їх розрахунку. Для

центрально розтягнутих та згинальних комбіновано армованих залізобетонних елементів вирішення цієї задачі пропонується досягти шляхом виконання математично планованих експериментів, на основі яких отримуються математичні моделі опору утворенню тріщин у розтягнутому бетоні названих елементів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1, 2] встановлено, що дисперсне армування бетону може суттєво підвищити опір тріщиноутворенню в розтягнутих та згинальних залізобетонних елементах.

На прикладі стіни циліндричного резервуара діаметром 18 м, товщина якої становить 0,16 м, доведено доцільність одночасного армування стержневою сталевую арматурою і сталевую хвилеподібною фіброю. Оптимальні параметри дисперсного армування визначалися на основі математичної моделі опору елемента розтягнню. Для цього виконано математично планований експеримент, у якому за фактори варіювання прийнята міцність (клас) бетону, довжина фібри та коефіцієнт об'ємного дисперсного армування.

На основі аналізу отриманої математичної моделі запропоновано варіанти оптимальних параметрів названих факторів впливу. Показано, що застосування комбінованого армування стіни резервуара при виборі відповідних параметрів може збільшити зусилля тріщиноутворення майже у 2,9 рази. У цьому випадку комбіноване армування дає змогу уникнути застосування високоміцної арматури та її попереднє напружування [1].

Позитивно впливає комбіноване армування і на тріщиностійкість згинальних елементів. У роботі [2] розглянуто вплив дисперсного армування на тріщиностійкість залізобетонної балки з поперечним перерізом  $0,25 \times 0,60$  м. За фактори впливу прийнято відсоток поздовжнього армування (від 0,5 до 1,5 %), відсоток вмісту фібри (від 0,2 до 1,8 %) і товщина шару дисперсно

армованого бетону в розтягнутій зоні  $c_f$  ( $c_f/h = 0,05; 0,15$  та  $0,25$ ). У розрахунках прийнято клас бетону С25/30, поздовжню арматуру класу А500С та сталеву хвилеподібну фібру довжиною 60 мм.

На підставі отриманої моделі для визначення моменту тріщиноутворення залежно від прийнятих факторів варіювання в роботі [2] зроблено висновок, що дисперсне армування шару бетону в розтягненій зоні змінює напружено-деформований стан поперечного перерізу та суттєво збільшує момент тріщиноутворення. Так, у балці з відсотком армування поздовжньою арматурою 1,5 %, відсотком дисперсного армування 1,8 % і товщиною шару дисперсного армування 9 см момент тріщиноутворення збільшився у 2,4 рази порівняно з балкою, у якої відповідні фактори впливу мали значення 0,5%; 1,0 %; 15 см.

У роботі [2] запропоновано методику визначення моменту тріщиноутворення в комбіновано армованих згинальних елементах та виявлено зменшення міцності дисперсно армованого бетону за однакового коефіцієнта фібрового армування зі збільшенням розмірів поперечного перерізу елементів.

Об'ємні експериментально-теоретичні дослідження фізико-механічних характеристик високоміцних бетонів і фібробетонів висвітлено в роботі [3]. Наведено загальні характеристики фібробетонів, методику визначення оптимального вмісту фібри в бетоні та способи її введення, розглянуто особливості структури, деформативності та морозостійкості фібробетонів.

У виконаних дослідженнях в роботі [4] доведена доцільність комбінованого армування при зведенні висячих оболонок, описаних по поверхні гіперболічного параболоїда.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою досліджень є узагальнення та удосконалення методики визначення оптимальних параметрів комбінованого армування залізобетонних

центрально розтягнутих і згинальних елементів, у яких у процесі експлуатації не допускається утворення тріщин.

Для досягнення мети поставлені для вирішення такі завдання:

- вибрати для дослідження залізо-бетонні елементи, встановити їх розміри;
- встановити основні фактори впливу та умови планування експерименту;
- виконати математично планований експеримент та побудувати математичні моделі для визначення внутрішніх зусиль в елементах перед утворенням тріщин;
- на основі аналізу отриманих математичних моделей визначити оптимальні параметри дисперсного армування досліджуваних елементів.

**Основна частина дослідження.** Для дослідження як центрально розтягнутий елемент прийнято нижній пояс ферми прольотом 18 м, який має поперечний прямокутний поперечний переріз розміром  $b \times h = 0,28 \times 0,24$  м. За розрахунком несучої здатності за граничними станами першої групи нижній пояс армується 4  $\varnothing$  28A500C ( $A_s = 24,63 \text{ см}^2$ ). Прийнятий поперечний переріз за розміром і формою суттєво відрізняється від поперечного перерізу, який досліджено в роботі [1]. Це дасть додаткову можливість оцінити вплив розмірів елементів на величину міцності дисперсно армованого бетону.

Як згинальний елемент розглядається балка з розмірами поперечного перерізу  $h \times b = 0,4 \times 0,2$  м. У розтягнутій зоні балка армувана 2  $\varnothing$  25A500C ( $A_s = 9,82 \text{ см}^2$ ), які розташовано в один ряд по висоті. Віддалі від нижньої розтягнутої грані балки до центра ваги арматури становить  $a_s = 4,5$  см.

Для підвищення тріщиностійкості нижній пояс ферми виконується з дрібнозернистого бетону з дисперсним армуванням усього об'єму. У згинальних елементах дисперсне армування бетону з товщиною шару  $c_f$  доцільно застосовувати тільки в розтягнутій зоні.

Дисперсне армування досягається введенням в об'єм бетонної матриці певної

кількості фібри. Бетон, армований рівномірно розподіленими в його об'ємі сталевими фібрами, називають сталевібро-бетоном [5]. Відношення об'єму фібри до одиниці об'єму бетонної матриці називають коефіцієнтом об'ємного дисперсного армування  $\mu_f$  (може виражатися у відсотках).

Опір сталевібробетону утворенню тріщин значною мірою залежить від його міцності при розтяганні, яка на стадії проектування визначається за формулами, наведеними в [5], і залежить від призмової міцності бетону при стисканні  $f_{ck}$ , а тому її слід приймати як основний фактор впливу і в числовому експерименті вона підлягає варіюванню.

На міцність сталевібробетону на розтяг суттєво впливають такі параметри дисперсного армування, як вид і товщина фібри  $l_f$  та коефіцієнт (відсоток) об'ємного армування  $\mu_f$ . Ці фактори потрібно включати до основних факторів впливу, і вони в числовому експерименті підлягають варіюванню.

Щодо впливу на міцність сталевібробетону геометричних розмірів поперечного перерізу елементів, то вони, як правило, призначаються за конструктивними й економічними міркуваннями і варіюванню в числовому експерименті не підлягають. У згинальних елементах також впливає на міцність сталевібробетону при розтягу товщина його шару в розтягнутій зоні. Як доведено в експериментах [2], міцність сталевібробетону збільшується зі зменшенням товщини його шару  $c_f$ , але за конструктивними вимогами вона повинна бути не меншою за захисний шар сталевібробетону. З метою забезпечення надійного зчеплення поздовжньою арматурою рекомендується товщину шару сталевібробетону в розтягнутій зоні згинальних елементів приймати у подвійній віддалі від нижньої грані елемента до центра ваги розтягнутої арматури ( $c_f = 2a_s$ ). У цьому разі варіювання величини  $c_f$  в експерименті також не доцільно.

Площа поперечного перерізу поздовжньої арматури  $A_s$  також не підлягає варіюванню, оскільки вона визначається розрахунком елементів за першою групою граничних станів.

Зважаючи на наведене, сформовано узагальнені умови планування експериментів для центрально розтягнутих та згинальних елементів (табл. 1).

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований	-1	0	+1	
Міцність $f_{ck}$ , МПа	$x_1$	18,5	22,0	25,5	3,5
Довжина фібр $l_f$ , мм	$x_2$	40	50	60	10
Коефіцієнт армування $\mu_{fv}$	$x_3$	0,004	0,011	0,018	0,007

В умовах планування експерименту характеристичні значення міцності бетону  $f_{ck}$  представлені для бетонів класів С20/25, С25/30 та С30/35. Довжина сталевих фібр відповідає вимогам ТУ У В.2.7.-28.7-00191046-015:2007 «Фібра із сталевого дроту». Коефіцієнт об'ємного армування фіброю з економічних міркувань приймається не більшим  $\mu_{fv} < 0,018$  [5].

За вихідні параметри  $u_i$  в числових математично планованих експериментах прийнято міцність сталевібробетону при розтягу  $f_{cftk}$ , розтягуючі зусилля в

центрально розтягнутому елементі перед утворенням тріщин  $S_{cftk}$ , момент у згинальному елементі перед утворенням тріщин  $M_{cftk}$ .

Міцність сталевібробетону на розтяг визначається за формулами держстандарту [5], структура яких залежить від відношення довжини анкерування фібри в бетоні  $f_{fb}$ , що забезпечує її розрив при висмикуванні, до її довжини  $l_f$ . При  $f_{fb} \geq l_f/2$ , що буває в цих експериментах, для всіх сполучень бетону і фібри значення  $f_{cftk}$  обчислюються за формулою

$$f_{cftk} = 1,1f_{ck} \left( K_T \frac{k_{or}^2 \mu_{fv} l_f}{8\eta_f d_f} + 0,008 - 0,5\mu_{fv} \right), \quad (1)$$

де  $K_T$  – коефіцієнт, який залежить від коефіцієнта  $\mu_{fv}$  і знаходиться за формулою [5] (при  $\mu_{fv} = 0,004; 0,011$  і  $0,018$  відповідно  $K_T = 0,47; 0,96$  і  $0,98$ );

$k_{or}$  – коефіцієнт, який ураховує орієнтацію фібр в об'ємі бетону залежно від співвідношення розмірів поперечного перерізу елемента до довжини фібри, приймається за таблицею [6];

$\eta_f$  – коефіцієнт, що враховує вид фібр (для хвилеподібної фібри  $\eta_f = 0,85$ );

$d_f$  – діаметр фібри ( $d_f = 1$  мм).

У центрально розтягнутому елементі опір зовнішньому навантаженню чинять внутрішні зусилля, які виникають у перерізі із сталевібробетону  $S_{cf,cre}$  та в розтягнутій арматурі  $S_{s,cre}$  [1, 5]. Вважається, що тріщини в сталевібробетоні можуть виникати, коли граничні деформації будуть перевищувати  $\varepsilon_{cftu} = 2f_{cftk}/E_{ck}$  ( $E_{ck}$  – початковий модуль пружності дрібнозернистого бетону) [1]. Приймавши деформації в арматурі перед утворенням тріщин рівними  $\varepsilon_s = \varepsilon_{cftu}$ , повне зусилля  $S_{cftk}$  (рис. 1), яке може сприйняти елемент перед утворенням тріщин, можна визначити за формулою

$$S_{cftk} = S_{cf,crс} + S_{s,crс} = bhf_{cftk} + \varepsilon_{cftu}E_sA_s, \quad (2)$$

де  $E_s$  – модуль пружності поздовжньої арматури.

У згинальних елементах зовнішньому згинальному моменту перед утворенням

тріщин у розтягнутій зоні чинять опір моменти, які виникають від внутрішніх зусиль у стиснутій зоні бетону, у розтягнутій зоні бетону і сталевібробетону та в розтягнутій арматурі (рис. 2).

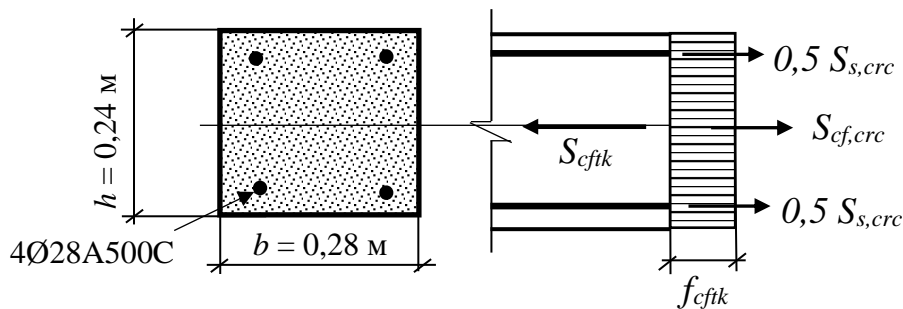


Рис. 1. Напружений стан центрально розтягнутого елемента перед утворенням тріщин

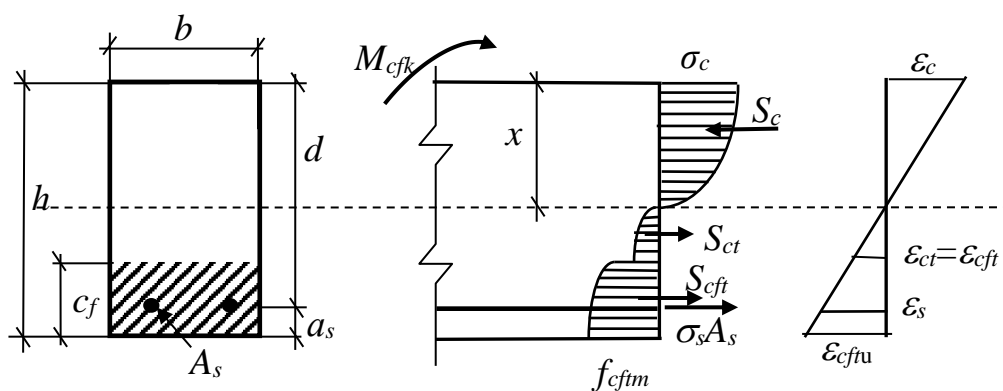


Рис. 2. Напружено-деформований стан поперечного перерізу згинального залізобетонного елемента з дисперсно армованим шаром у розтягнутій зоні перед утворенням тріщин

Згинальний момент, який може сприйняти згинальний елемент перед утворенням тріщин можна визначити за формулами, які наведено в роботі [2]

$$M_{cfk} = M_c + M_{ct} + M_{cft} + M_s, \quad (3)$$

де  $M_c$ ,  $M_{ct}$ ,  $M_{cft}$  і  $M_s$  – згинальні моменти від внутрішніх зусиль відповідно в стиснутій зоні бетону, у розтягнутому бетони без

додавання фібри, в розтягнутому дисперсно армованому бетони і в розтягнутій арматурі відносно нейтральної лінії (рис. 2).

Умови планованого експерименту реалізуються за допомогою матриці плану Бокса – Бенкіна [6], яка містить у собі 13 точок плану, у кожній із яких визначаються вихідні параметри  $y_i$  за формулами (1) – (3). План числового експерименту та значення вихідних параметрів наведено в табл. 2.

Матриця плану Бокса-Бенкіна та вихідні параметри  
(в дужках подано кодові значення факторів)

Точки плану	Матриця планування			Вихідні параметри			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Розтягнутий елемент		Згинальний елемент	
	$f_{ck}$ , МПа	$l_f$ , мм	$\mu_{fv}$	$f_{ctk}$ , МПа	$S_{ctk}$ , кН	$f_{ctk}$ , МПа	$M_{ctk}$ , МПа
1	25,5 (1)	60 (1)	0,011(0)	2,92	317,0	3,16	17,1
2	25,5 (1)	40 (-1)	0,011 (0)	2,61	304,0	2,70	16,9
3	18,5 (-1)	60 (1)	0,011 (0)	2,12	246,9	2,29	14,0
4	18,5(-1)	40 (-1)	0,011(0)	1,83	220,1	1,96	11,9
5	25,5 (1)	50 (0)	0,018 (1)	3,10	336,6	3,38	18,3
6	25,5 (1)	50 (0)	0,004(-1)	2,31	250,8	2,34	12,4
7	18,5 (-1)	50 (0)	0,018(1)	2,25	262,0	2,45	15,2
8	18,5 (-1)	50 (0)	0,004(-1)	1,67	194,5	1,70	10,2
9	22,0 (0)	60 (1)	0,018(1)	2,92	327,6	3,26	19,2
10	22,0 (0)	60 (1)	0,004(-1)	2,02	226,6	2,05	11,6
11	22,0 (0)	40 (-1)	0,018(1)	2,47	277,1	2,60	15,0
12	22,0 (0)	40 (-1)	0,004(-1)	1,97	221,0	1,98	11,2
13	22,0 (0)	50 (0)	0,011(0)	2,37	265,9	2,52	13,5

За результатами числового планового експерименту для кожного вихідного

параметра отримують квадратичне рівняння регресії, яке має такий вигляд:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (4)$$

де  $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$  – коефіцієнти рівняння регресії, які для плану Бокса-Бенкіна визначаються статистичним шляхом за формулами [6].

Ураховуючи значущі коефіцієнти, які визначаються за критерієм Стюдента, рівняння (4) набуває вигляду математичної моделі для кожного вихідного параметра:

$$S_{ctk} = 265,9 + 32,6x_1 + 12,0x_2 + 38,8x_3 + 20,0x_1^2 + 21,1x_2^2 + 11,0x_3^2 + 11,2x_2x_3. \quad (5)$$

$$M_{ctk} = 13,5 + 1,7x_1 + 2,8x_3 + 1,3x_1^2 + 1,8x_2^2 + 2,2x_3^2 + 1,0x_2x_3. \quad (6)$$

Аналіз результатів, наведених у табл. 2, свідчить, що дисперсне армування нижнього поясу ферми може збільшити його опір тріщиноутворенню на 50–60 %. Так, для класу бетону С25/30 при

використанні фібри 60 мм і коефіцієнти об'ємного дисперсного армування збільшення зусилля перед утворенням тріщин становить 62,2 %.

З графіків залежності зусилля тріщиноутворення від основних факторів впливу для класу бетону С 25/30 (рис. 3, а) видно, що воно збільшується майже пропорційно зі збільшенням коефіцієнта

об'ємного дисперсного армування. Залежність зусилля тріщиноутворення від довжини фібри має криволінійний характер (рис. 3, б), водночас найбільш ефективною є фібра довжиною 60 мм.

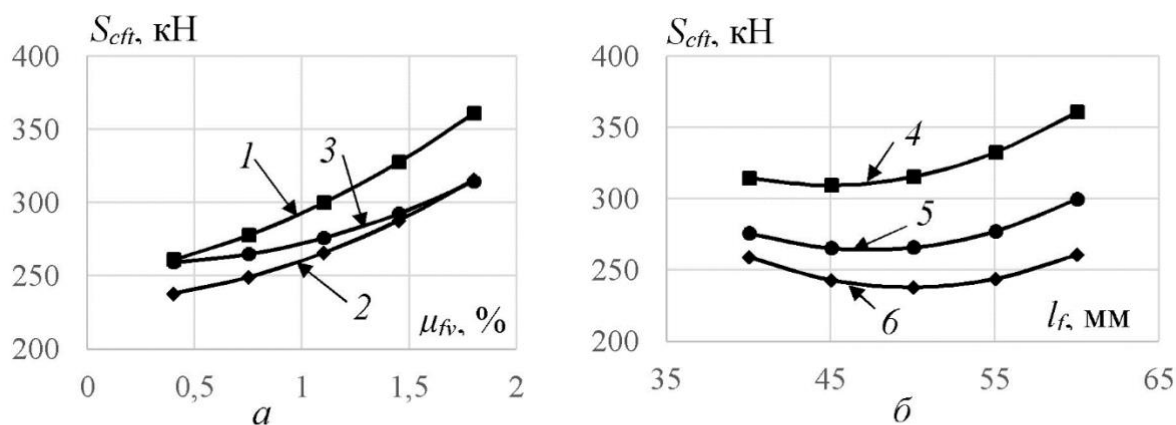


Рис. 3. Залежність зусилля тріщиноутворення  $S_{cft}$  від відсотка об'ємного дисперсного армування  $\mu_{fv}$  (а) та довжини фібри  $l_f$  (б):  
1, 2, 3 – відповідно довжина фібри 60, 50, 40 мм; 4, 5, 6 – відповідно коефіцієнт об'ємного армування 0,018; 0,011; 0,004

Суттєво підвищується тріщиностійкість згинальних елементів з частковим дисперсним армуванням розтягнутої зони бетону. Графіки залежності моменту тріщиноутворення  $M_{cft}$  від довжини фібри та коефіцієнта об'ємного армування, які побудовано за формулою (6) засвідчують криволінійний їх характер (рис. 4).

Особливо момент тріщиноутворення стрімко зростає зі збільшенням відсотка об'ємного армування при використанні фібри довжиною 60 мм (рис. 4, а).

В елементі, для якого використовується бетон класу С25/30, при армуванні фіброю довжиною 60 мм з коефіцієнтом об'ємного армування 0,018 момент тріщиноутворення збільшується у 2,4 рази. Для класів бетону С20/25 і С30/35 таке збільшення становить 2,2 рази.

Якщо аналізувати графіки на рис. 3, б і 4, б, можна дійти висновку, що найбільш ефективна фібра для дисперсного армування довжиною 40 і 60 мм. Найбільш раціональним класом бетону виявився клас бетону С25/30.

Отримані математичні моделі (5) і (6) дають можливість проаналізувати вплив параметрів дисперсного армування на зусилля тріщиноутворення в комбіновано армованих залізобетонних елементах та визначити їхні оптимальні значення. Для розглянутих центрально розтягнутого та згинального елемента з метою збільшення опору тріщиноутворенню для їх виготовлення можна рекомендувати клас бетону С25/30, довжину фібри 60 мм при коефіцієнті об'ємного армування 0,018 (1,8 %).

Визначення параметрів комбінованого армування залізобетонних конструкцій можна виконувати в такій послідовності:

- визначаються розміри поперечного перерізу елементів;
- розрахунком за граничними станами першої групи призначається поздовжня стержнева арматура та її захисний шар бетону;
- у розтягнутій зоні згинальних елементів визначається товщина шару для дисперсного армування;

- призначаються з урахуванням конструктивних та економічних вимог фактори впливу, їх інтервали варіювання;  
 - формуються умови для планованого експерименту;  
 - виконується математично планований експеримент та будуються математичні

моделі для визначення зусиль опору тріщиноутворенню в бетоні;

- на основі математичних моделей визначаються параметри дисперсного армування з урахуванням того, щоб за такого армування зусилля тріщиноутворення перевищували зусилля від зовнішнього навантаження.

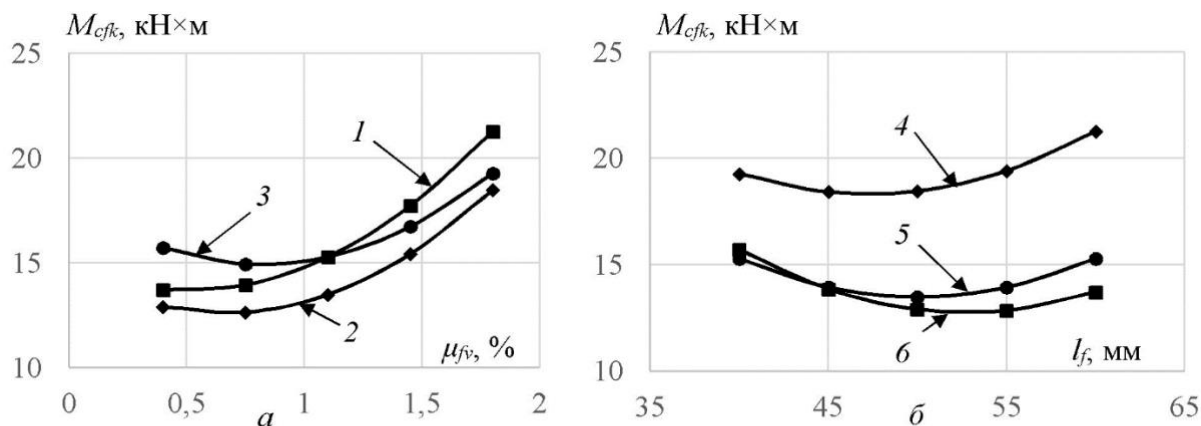


Рис. 4. Залежність моменту тріщиноутворення в згинальному елементі  $M_{cfk}$  від відсотка об'ємного дисперсного армування  $\mu_{fv}$  (а) та довжини фібри  $l_f$  (б): 1, 2, 3 – відповідно довжина фібри 60, 50, 40 мм; 4, 5, 6 – коефіцієнт об'ємного армування 0,018; 0,011; 0,004

### Висновки

1. Розроблено узагальнену методику визначення параметрів комбінованого армування центрально розтягнутих та згинальних залізобетонних елементів, яка базується на аналізі математичних моделей внутрішніх зусиль, що чинять опір утворенню тріщин.

2. Установлено основні фактори впливу на тріщиностійкість елементів, які підлягають варіюванню при виконанні математично планованого експерименту.

3. Доведено, що при використанні дисперсного армування зусилля тріщиностійкості в елементах можуть бути збільшені у два і більше разів.

### Список використаних джерел:

1. Тріщиностійкість центрально розтягнутих комбіновано армованих залізобетонних елементів / О. В. Андрійчук, В. Є. Бабич, О. Є. Поляновська, І. В. Швець. *Сучасні технології та методи розрахунків в будівництві: зб. наук. праць*. Луцьк: Луцький НТУ, 2020. Вип. 14. С. 13–25.
2. Бабич В. Є., Поляновська О. Є., Швець І. В. Вплив дисперсного армування розтягнутої зони залізобетонних балок на їхню тріщиностійкість. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне: Волинські обереги, 2019. Вип. 37. С. 118–128.
3. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Л. Й. Дворкін, Є. М. Бабич, В. В. Житковський та ін. Рівне: НУВГП, 2017. 331 с.



4. Determination of stresses in thin-walled steel fiber reinforced concrete roofs in the form of hyperbolic paraboloid / Ye. M. Babych, O. V. Andriichuk, S. O. Uzhehov, R. V. Pasichnyk, D. Y. Kysliuk. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering–MSE, 2019. Vol. 708, N 1, 012042, P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012042>.

5. ДСТУ–Н Б В.2.6-218:2016. Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Чинний з 2017-04-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 49 с.

6. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язання будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне: НУВГП, 2011. 174 с.

---

Бабич Володимир Євгенійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів і тунелів, будівельної механіки та опору матеріалів Національного університету водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0003-2811-2423. E-mail: v.e.babich@nuwm.edu.ua.

Полянська Олена Євгенівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів і тунелів, будівельної механіки та опору матеріалів Національного університету водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0001-8334-8827. E-mail: o.le.polianovska@nuwm.edu.ua.

Швець Ігор Вікторович, аспірант кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0001-5208-2667. E-mail: 43206@ukr.net.

Babich Volodymyr, PhD (Tech), docent of the department of bridges, tunnels, strength of materials and structural mechanics in National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0003-2811-2423. E-mail: v.e.babich@nuwm.edu.ua.

Polianovska Olnf, PhD (Tech), docent of the department of bridges, tunnels, strength of materials and structural mechanics in National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0001-8334-8827. E-mail: o.le.polianovska@nuwm.edu.ua.

Shvets Igor, postgraduate student, department of industrial, civil engineering and engineering structures in National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0001-5208-2667. E-mail: 43206@ukr.net.

Статтю прийнято 28.10.2021 р.

УДК 666.972.16

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ САМОНАПРУЖЕНОГО БЕТОНУ

Кандидати техн. наук Є. І. Галагурия, О. А. Беліченко, М. В. Павлюченко,  
Л. Б. Кравців, асп. І. В. Биченок

## EXPERIMENTAL STUDIES OF SELF-STRESSED CONCRETE

PhD (Tech.) E. Galagurya, PhD (Tech.) O. Belichenko, PhD (Tech.) M. Pavliuchenkov,  
PhD (Tech.) L. Kravtsiv, postgraduate student I. Buchenok

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256539>

---

*Анотація.* У статті розглянуто лабораторні дослідження самонапружених бетонних зразків. Для цього було виготовлено та випробувано п'ять серій призм та кубиків з різним складом. На наступному етапі дослідження було випробувано зразки на фізико-механічні характеристики та компоненти на рН-метрів. Для цього випробувано водні розчини добавок і суспензій цементу вибраних компонентів на рН і ЕРС.

*Ключові слова:* самонапружений бетон, самонапруження, попереднє напруження, рН-метрів.

---

**Abstract.** *The paper considers the test results self-stressed concrete.*

*In previous studies, it was noted that if the required level of pre-stress of concrete is provided, that is, at the level of a certain effective value, which depends on the structural and strength parameters of the structural element, then in the limit state it is possible to fully use the strength properties of steel, and the concrete core operates in a three-axis stress state under compression with extreme values of longitudinal and radial stress. Therefore, it is necessary to study different compositions of self-stressed concrete. To achieve this goal, five series of prisms with different compositions were manufactured and tested. According to the results of experimental studies, it was found that the first, fourth and fifth series of prisms corresponds to the self-stress brand Sp 1.2 and is self-stressed concrete the second series of prisms does not correspond to any of the self-stress brands due to the high content of Portland cement, the third series of prisms corresponds to the self-stress brand Sp 0.6 and is non-shrinkable concrete. Since the selected concrete is planned to be used as the core of a steel concrete column it is advisable to check the ph metric of the given components.*

*At the next stage of the study, the cement of the selected components was tested for ph-metry. For this purpose, aqueous solutions of cement additives and suspensions of selected components were tested for pH and EMF. As a result, possible inhibition of metal corrosion is also confirmed by high pH values of the liquid phase at the level of 8.25 1 13.85 (which is significantly higher than neutral pH = 7) in the presence of both individual additives and cement suspensions containing additives. Therefore, the use of self-stressed concrete with these additives is advisable.*

**Keywords:** *Self-stressed concrete, self-stress, prestressing, ph-metric.*

**Вступ.** У дослідженнях [1–7] зазначено, якщо забезпечено необхідний рівень попереднього напруження бетону, тобто на рівні певного ефективного значення, яке залежить від конструктивних та міцнісних параметрів елемента конструкції, то в граничному стані можливим є повне використання міцнісних властивостей сталі, а бетонне ядро працює в умовах тривісного напруженого стану при стиску з екстремальними значеннями поздовжнього та радіального напруження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням самонапруженого бетону присвячено роботи [1–4]. В роботі [1] наведено результати досліджень міцності і деформаційних характеристик напруженого цементу, модифікованого добавкою нітрату кальцію. Застосування напруженого цементу без модифікуючих добавок, склад якого підібраний за стандартною методикою, в умовах низьких позитивних температур твердіння обмежено внаслідок можливого руйнування на початкових етапах. У ході досліджень установлено, що використання напруженого цементу з добавкою нітрату кальцію дає

зможу отримати стабільне кероване самонапруження як для нормальних, так і для низьких позитивних температур твердіння; виявлено, що введення добавки нітрату кальцію дає змогу підвищити межу міцності при стисненні на 15...20 % та отримати енергію самонапруження від 2 до 3 МПа в умовах низьких позитивних температур. У роботах [2, 3] описано експериментальні дослідження самонапружених сталетруبوبетонних елементів, які свідчать про ефективність застосування комплексної добавки для отримання самонапружених сталетруبوبетонних елементів. При цьому можливо отримувати необхідну величину самонапруження бетону, варіюючи кількісний склад напруженого цементу і його витрати. Застосування комплексної розширюючої добавки дало змогу вирішити основну проблему використання класичних напружених цементів і бетонів на їх основі в труبوبетоні – зростання власних деформацій в умовах ізоляції без доступу додаткової вільної води в процесі гідратації, необхідної для перекристалізації моносульфату в еттрингіт. У роботі [4] розглянуто властивості самонапруженого бетону в

різних обмежувальних умовах. Дослідженням напруженого бетону, отриманого шляхом фізичного впливу на бетонну суміш, присвячено роботи [5–7]. У роботі [6] запропоновано спосіб виготовлення трубобетонних елементів, який дає змогу завдяки послідовному введенню в бетонну суміш внутрішніх сталевих сердечників створювати в ній пресуючий тиск, відводити з неї віджату воду і виключити ефект розпресування, що виявляється при пресуванні за допомогою пустотоутворювачів. Це дає можливість на рядових цементах і заповнювачах отримувати високоміцні бетони і створювати попереднє обтиснення бетонного ядра величиною близько 2,5–3 МПа, завдяки чому істотно підвищується міцність трубобетонних елементів. У роботі [7] розглянуто три способи отримання внутрішнього напруження в сталевій оболонці: тривалим пресуванням бетонної суміші за допомогою пустотоутворювача спеціальної конструкції; пресуванням бетонної суміші послідовним вдавленням в неї сталевих трубок уздовж напрямного стержня; з використанням енергії напруженого цементу. Отримано внутрішні обтиснення бетонного ядра: за допомогою пустотоутворювача 2–3 МПа; спеціальної конструкції при тривалому пресуванні бетонної суміші на рівні 1,5–3 МПа; з використанням енергії напруженого цементу 1,5–2 МПа.

Але не всі питання вирішено. Зокрема, не відомо, яка корозійна стійкість металу при використанні самонапруженого бетону як ядра.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Дослідити різні склади самонапруженого бетону для отримання даних про самонапруження, фізико-механічні характеристики, а також корозійну стійкість для використання самонапруженого бетону як ядра сталобетонної колони.

Для досягнення цієї мети необхідно провести лабораторні випробовування зразків на самонапруження, фізико-механічні характеристики та порівняти ці дані з нормативними. Також необхідно провести випробовування компонентів на рН-метрію для отримання даних про корозійну стійкість металу.

**Основна частина дослідження.** Випробовування на самонапруження проводилися згідно з методикою, наведеною у [8].

За результатами випробовування було отримано дані, які наведено в табл. 1–5.

Було виготовлено п'ять серій призм. Перша серія виготовлялася за методикою [1, 9] зі складом на 1 м<sup>3</sup>: напружений цемент (портландцемент М400 – 83 %, глиноземистий цемент ГЦ-40 – 10 %, гіпс будівельний – 7 %) – 496 кг; пісок річковий – 875 кг; щебінь фр. 5–10 – 1250 кг; вода – 250 л.

Таблиця 1  
Результати вимірювання першої серії призм

Доба	Показання індикатора	$\Delta$	Самонапруження $R_{bs}$ , МПа
1	0	0	0
2	0.011	0.022	0.131
3	0.021	0.042	0.251
4	0.031	0.062	0.37
5	0.04	0.08	0.477
6	0.045	0.09	0.537
7	0.048	0.096	0.573
10	0.062	0.124	0.74
14	0.081	0.162	0.966
28	0.088	0.176	1.05

Друга серія призм виготовлена за технологією ТМ «МАРЕІ» зі складом на 1 м<sup>3</sup>: портландцемент М400 – 562.5 кг; пісок річковий – 875 кг; щебінь фр. 5–10 – 1250 кг;

вода – 250 л (до бетону додавалися наступні добавки: Dynamon SR3 – 5.625 кг; Маресure SRA – 6.25 кг; Expancrete – 37.5 кг).

Таблиця 2

Результати вимірювання другої серії призм

Доба	Показання індикатора	$\Delta$	Самонапруження $R_{bs}$ , МПа
1	0	0	0
2	0.001	0.002	0.0105
3	0.0025	0.005	0.02625
4	0.003	0.006	0.0315
5	0.0035	0.007	0.03675
6	0.004	0.008	0.042
7	0.005	0.01	0.0525
10	0.006	0.012	0.063
14	0.007	0.014	0.0735
28	0.01	0.02	0.105

Третя серія призм – бетон підібраний згідно з [9] з добавками ТМ «МАРЕІ» зі складом на 1 м<sup>3</sup>: портландцемент М400 – 496 кг; пісок річковий – 875 кг; щебінь фр.

5–10 – 1250 кг; вода – 250 л (до бетону додавалися такі добавки: Dynamon SR3 – 4.117 кг; Маресure SRA – 4.569 кг; Expancrete – 27.5 кг).

Таблиця 3

Результати вимірювання третьої серії призм

Доба	Показання індикатора	$\Delta$	Самонапруження $R_{bs}$ , МПа
1	0	0	0
2	0.008	0.016	0.084
3	0.011	0.022	0.1155
4	0.015	0.03	0.1575
5	0.019	0.038	0.1995
6	0.02	0.04	0.21
7	0.023	0.046	0.2415
10	0.028	0.056	0.294
14	0.033	0.066	0.3465
28	0.047	0.094	0.4935

Четверта серія призм – бетон підібраний згідно з [1, 9] з добавками ТМ «МАРЕІ» зі складом на 1 м<sup>3</sup>: напружений цемент – 496 кг; пісок річковий – 875 кг;

щебінь фр. 5–10 – 1250 кг; вода– 250 л (до бетону додавалися такі добавки: Маресуре SRA – 4.569 кг; Дунатон SR3 – 4.117 кг.

Таблиця 4

Результати вимірювання четвертої серії призм

Доба	Показання індикатора	$\Delta$	Самонапруження $R_{bs}$ , МПа
1	0	0	0
2	0.01	0.02	0.119
3	0.017	0.034	0.203
4	0.029	0.058	0.346
5	0.035	0.07	0.418
6	0.039	0.078	0.465
7	0.04	0.08	0.477
10	0.059	0.118	0.704
14	0.073	0.146	0.871
28	0.081	0.162	0.966

П'ята серія призм – бетон підібраний згідно з [1, 9] з добавками ТМ «МАРЕІ» зі складом на 1 м<sup>3</sup>: напружений цемент – 496 кг; пісок річковий – 875 кг; щебінь фр. 5–10 – 1250 кг; вода – 250 л (до бетону

додавалися такі добавки: Маресуре SRA – 4.569 кг; Дунатон SR3 – 4.117 кг.

За отриманими результатами побудовано графіки набору самонапруження (рис. 1).

Таблиця 5

Результати вимірювання п'ятої серії призм

Доба	Показання індикатора	$\Delta$	Самонапруження $R_{bs}$ , МПа
1	0	0	0
2	0.015	0.03	0.179
3	0.02	0.04	0.239
4	0.03	0.06	0.358
5	0.035	0.07	0.418
6	0.039	0.078	0.465
7	0.042	0.084	0.501
10	0.06	0.12	0.716
14	0.075	0.15	0.895
28	0.083	0.166	0.99

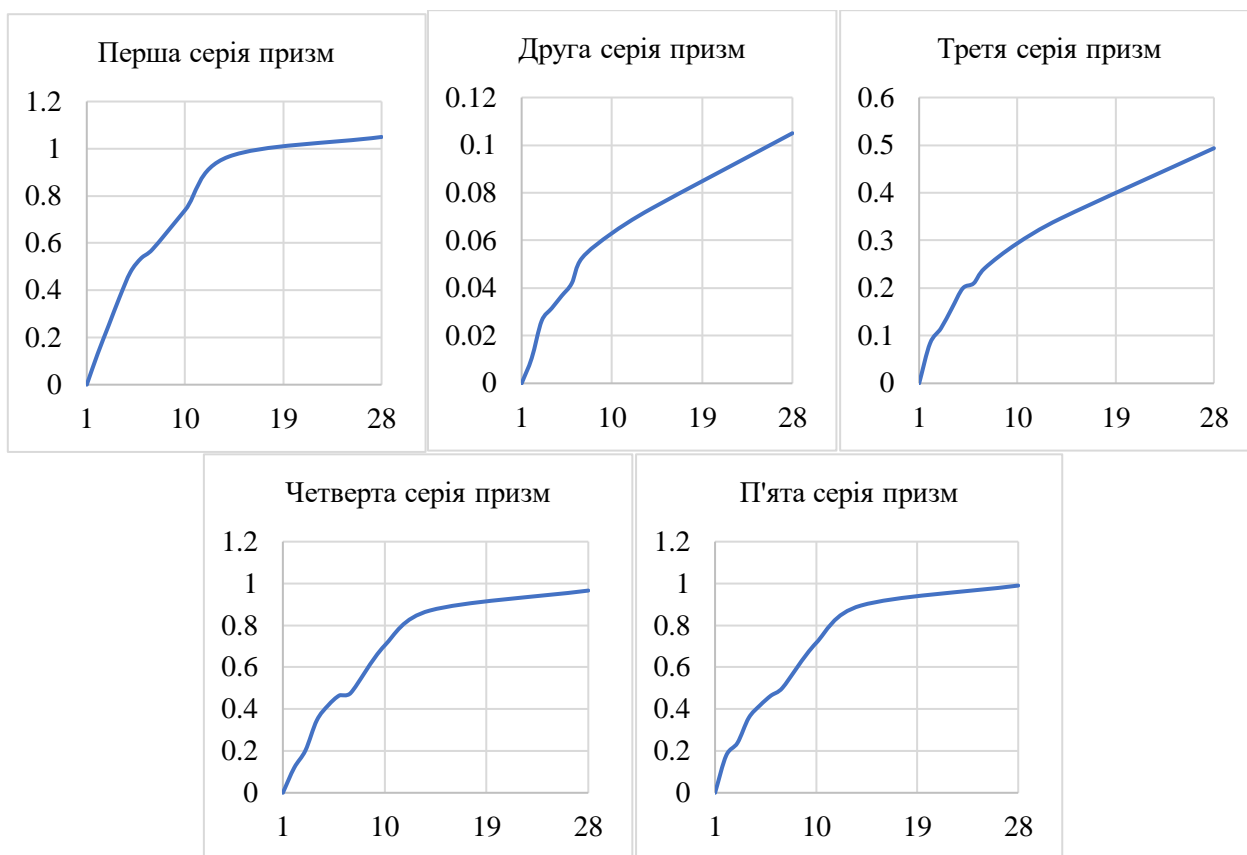


Рис. 1. Графіки набору самонапруження

Для п'яти серій кубиків (С1-С5) та для п'яти серій призм (Р1-Р5) випробовування на фізико-механічні характеристики проводилися згідно з методикою, наведеною у [10, 11].

За результатами випробовування отримано фізико-механічні характеристики, наведені в табл. 6–10.

Перша серія отримана з такими характеристиками: клас бетону С30/35, модуль пружності  $E_{cm} = 34.9 \cdot 10^3$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0.187$

Друга серія отримана з такими характеристиками: високоміцний бетон,

модуль пружності  $E_{cm} = 37.1 \cdot 10^3$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0.23$ .

Третя серія отримана з такими характеристиками: клас бетону С50/60, модуль пружності  $E_{cm} = 33.4 \cdot 10^3$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0.21$ .

Четверта серія отримана з такими характеристиками: клас бетону С30/35, модуль пружності  $E_{cm} = 34.7 \cdot 10^3$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0.197$ .

П'ята серія отримана з такими характеристиками: клас бетону С25/30, модуль пружності  $E_{cm} = 32.5 \cdot 10^3$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0.195$ .

Таблиця 6

Результати вимірювання першої серії

Параметр	С1-1, Р1-1	С1-2, Р1-2	С1-3, Р1-3
$f_{c, cube} / f_{c, prism}$ , МПа	40.2/34.8	37.9/32.3	42.2/33.5
$E_{cm} 10^3$ , МПа	34.9	35.8	35.3
$\nu$	0.189	0.187	0.19

Таблиця 7

## Результати вимірювання другої серії

Параметр	C2-1, P2-1	C2-2, P2-2	C2-3, P2-3
$f_{c, cube} / f_{c, prism}$ , МПа	68.7/62.3	69.3/64.2	71.5/64
$E_{cm} 10^3$ , МПа	37.1	38.3	37.2
$\nu$	0.23	0.24	0.23

Таблиця 8

## Результати вимірювання третьої серії

Параметр	C3-1, P3-1	C3-2, P3-2	C3-3, P3-3
$f_{c, cube} / f_{c, prism}$ , МПа	61/58.7	60.1/58.4	60.2/58.9
$E_{cm} 10^3$ , МПа	34.4	34.8	35
$\nu$	0.21	0.22	0.21

Таблиця 9

## Результати вимірювання четвертої серії

Параметр	C4-1, P4-1	C4-2, P4-2	C4-3, P4-3
$f_{c, cube} / f_{c, prism}$ , МПа	37.3/35.1	36.6/34.8	36.1/34.9
$E_{cm} 10^3$ , МПа	35.1	34.7	34.8
$\nu$	0.197	0.2	0.198

Таблиця 10

## Результати вимірювання п'ятої серії

Параметр	C5-1, P5-1	C5-2, P5-2	C5-3, P5-3
$f_{c, cube} / f_{c, prism}$ , МПа	32.3/30.2	33.4/29.8	33.7/29.7
$E_{cm} 10^3$ , МПа	32.5	33.1	32.7
$\nu$	0.195	0.197	0.195

Оскільки бетон для першої, третьої, четвертої та п'ятої серій було підбрано для класу C20/25 то порівняно з експериментальними дослідженнями, які проводилися у [12], міцність самонапруженого бетону в середньому зросла для першої серії в 1.4 разу, для третьої серії – у 2.5 разу, для четвертої серії – в 1.5 разу і для п'ятої серії – в 1.3 разу.

Оскільки бетон, що підбирається, планується для використання як ядро сталобетонної колони, то доцільною є перевірка рН-метрії наведених компонентів і корозійної стійкості металу.

Випробовування рН і ЕРС проводили за допомогою приладу рН-метр рН-150МІ, який оснащено комбінованим електродом і

термометром (для вимірювання температури розчинів). Дані випробувань наведено в табл. 11.

Характеристики приладу. Діапазон вимірювань:

- показник активності іонів водню (рН): від -1 до +14, дискретність 0,01;

- окислювально-відновний потенціал або електрорушійна сила (ЕРС): від -2000 до + 2000, дискретність 1;

- температура аналізованого середовища: від -10 до +100 °С.

У розчинів окислювально-відновний потенціал є мірою хімічної активності елементів або їх сполук в оборотних хімічних процесах, пов'язаних зі зміною заряду іонів у розчинах.

Для виготовлення водних розчинів добавок і суспензій цементу застосовували дистильовану воду. Вимірювання проводили при температурі водних розчинів добавок і суспензій цементу + 19 °С.

Після приготування водних розчинів добавок і суспензій цементу електродну систему занурювали в розчин і витримували 60 с, після чого записували показання приладу.

Таблиця 11

## Результати вимірювань

№ з/п	Кількість і вид добавок	pH	ЕРС, mV
1	Вода дистильована	6,78	+ 44
2	3 %-й водний розчин Dynamon SX45	8,25	+ 32
3	3 %-й водний розчин Dynamon SX45 + 7,5 %-й Маресуре SRA	8,28	+ 30
4	3 % водний розчин Dynamon SX45 + 7,5 % Маресуре SRA + Expancrete	13,48	- 273
5	10 %-ва суспензія цементу ПЦ 400	13,46	- 271
6	10 %-ва суспензія цементу ПЦ 400 + Dynamon SX45 0,5 % від m <sub>ц</sub>	13,48	- 272
7	10 %-ва суспензія цементу ПЦ 400 + Expancrete 5 % від m <sub>ц</sub>	13,74	- 288
8	10 %-ва суспензія цементу НЦ 1,2	13,58	- 278
9	10 %-ва суспензія цементу НЦ 1,2+ Dynamon SX45 0,5 % від m <sub>ц</sub>	13,54	- 275
10	10 %-ва суспензія цементу НЦ 1,2 + Expancrete 5 % від m <sub>ц</sub>	13,85	- 293

При зіткненні провідника першого роду (електрода) з полярним розчинником (водою) або розчином електроліту на границі електрод – рідина виникає подвійний електричний шар.

Якщо розглядати металеву обойму як електрод (позитивно заряджений електрод, тобто катод), то зміна знака ЕРС розчинів з позитивного на негативний свідчить про те, що біля поверхні металу виникає подвійний електричний шар.

Потенціалвизначальними іонами є іони металу, а протиіонами, зокрема які містяться в дифузному шарі ПЕШ, будуть частки добавки (або добавок). У такому разі відбуваються електрохімічні процеси відновлення, і розчинення іонів металу не відбувається (перехід іонів металу в розчин не відбувається), що означає відсутність корозії.

Якщо метал заряджений позитивно, то цемент і добавка є поставачальниками негативно заряджених іонів.

Перебіг реакції відновлення підтверджується зміною знака заряду ЕРС [13].

**Висновки.** За результатами експериментальних досліджень встановлено, що перша, четверта і п'ята серії призм відповідають марці по самонапруженню Sp 1.2 і є самонапруженим бетоном, друга серія призм не відповідає жодній із марок по самонапруженню через великий вміст портландцементу, третя серія призм відповідає марці по самонапруженню Sp 0.6 і є безсадковим бетоном. Також за результатами випробовування на фізико-механічні характеристики було отримано що перша і четверта серії відповідають класу бетону С30/35, друга серія є високоміцним бетоном, третя серія відпо-



відає класу бетону C50/60, п'ята серія – клас бетону C25/30. Можливе інгібування корозії металу підтверджує також високі значення рН рідкої фази на рівні 8,25...13,85 (що значно вище нейтрального рН = 7) за наявності як окремо взятих добавок, так і

цементних суспензій, у яких містяться добавки. Тому використання самоупругеного бетону з наведеними добавками є доцільним для застосування як ядра сталевенної колони.

### Список використаних джерел

1. Савеня Д. Н., Соловьев Д. А., Плосконосов В. Н. Особенности прочностных и деформационных характеристик напрягающего цемента, модифицированного добавкой нитрата кальция. *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2009. № 6. С. 53–56.
2. Павлова И. П., Бондаренко В. М. Перспективы применения бетонов на напрягающем цементе при изготовлении сталебетонных элементов. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 664. С. 133–144.
3. Мартиросов Г. М., Шахворостов А. И. Трубобетонные элементы из бетона на напрягающем цементе. *Бетон и железобетон*. 2001. № 4. С. 12–13.
4. Chang X., Huang C., Zhang P. Expansive behaviors of self-stressing concrete under different restraining conditions. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 2011. 26(4). P. 780–785.
5. Харченко С. А. Напряженно-деформированное состояние трубобетонных элементов с упрочненными ядрами: автореф. дисс... канд. техн. наук. Минск, 1987. 16 с.
6. Сахаров А. А. Несущая способность трубобетонных элементов с бетоном, твердеющим под давлением: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Самара, 1999. 23 с.
7. Кришан А. Л. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатим ядром: дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Магнитогорск, 2011. 335 с.
8. Пособие к СНиП 2.03.01-84. Пособие по проектированию самоупругенных железобетонных конструкций (к СНиП 2.03.01-84). Москва, 1986. 49 с. (Информация и документация).
9. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний від 2010-09-01]. Київ, 2010. 18 с. (Інформація та документація).
10. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Київ, 2010. 43 с. (Інформація та документація).
11. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона. [Чинний від 2010-09-01]. Київ, 2010. 16 с. (Інформація та документація).
12. Berestianskaya S., Galagurya E., Oranasenko O., Berestianskaya A., Bychenok I. Experimental Studies of Fiber-Reinforced Concrete Prisms Exposed to High Temperatures. *Key Engineering Materials*. 2020. Volume 864. P. 3–8.
13. Киреев В. А. Курс физической химии. Москва: Химия, 1975. 776 с.

Галагура Євгеній Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)7301070.

E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3075-8651.

Беліченко Олена Анатоліївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів і хімії Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Тел.: (057)7073726. E-mail: chemistry@khadi.kharkov.ua. ORCID: 0000-0002-7444-8188.

Павлюченко Михайло Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського Державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)7301071.

E-mail: pavliuchenkov@ukr.net. ORCID: 0000-0003-0542-7284.

Кравців Лариса Богданівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)7301070.

E-mail: Laura\_Kravtsiv@ukr.net. ORCID: 0000-0003-4632-6148.

Биченок Ігор Володимирович, аспірант кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)7301071. E-mail: igorbuchenok2111@gmail.com.

ORCID: 0000-0002-6249-0303.

Galagurya Evgeniy, PhD (Tech). Associate Professor, department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)7301070. E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3075-8651.

Belichenko Olena, PhD (Tech). Senior Researcher, department of technologies of road-building materials and chemistry, Kharkiv national automobile and highway university. (057)7073726. E-mail: chemistry@khadi.kharkov.ua. ORCID: 0000-0002-7444-8188.

Pavliuchenkov Mykhailo, PhD (Tech). Associate Professor, department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)7301070. E-mail: pavliuchenkov@ukr.net.

ORCID: 0000-0003-0542-7284.

Kravtsiv Larysa, PhD (Tech). Associate Professor, department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)7301070. E-mail: Laura\_Kravtsiv@ukr.net.

ORCID: 0000-0003-4632-6148.

Buchenok Ihor, postgraduate student, department of structural mechanics and hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)7301071. E-mail: igorbuchenok2111@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6249-0303.

Статтю прийнято 10.11.2021 р.

УДК 666.972

## ВПЛИВ ПОЛІПРОПІЛЕНОВОЇ ФІБРИ X-Mesh НА ВЛАСТИВОСТІ ДОРОЖНЬОГО БЕТОНУ

Д-р техн. наук С. М. Толмачов, канд. техн. наук О. А. Беліченко, Р. В. Дядюшко

## INFLUENCE OF X-Mesh POLYPROPYLENE FIBER ON THE PROPERTIES OF ROAD CONCRETE

D. Sc. (Tech.) S. Tolmachov, PhD (Tech.) O. Belichenko, R. Diadiushko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256587>

---

***Анотація.** У статті розглянуто переваги та недоліки застосування різних видів фібри у технології важких цементних бетонів. У роботі застосовували полімерну фібру X-Mesh довжиною 23 і 39 мм, діаметром волокон 100...150 мкм. Експериментальні дослідження показали, що фібра X-Mesh може утворювати всередині бетону структурний каркас. Тому при введенні цієї фібри у склад бетону його міцність за стиском не знижується, на відміну від бетонів з іншими типами фібри. Крім того, фібра X-Mesh дисперсно армує структуру бетону, що приводить до збільшення міцності за згином на 22 %. Дослідження міцності фіброармованого бетону показали, що оптимальна кількість фібри X-Mesh складає 1,5 кг/м<sup>3</sup>. Встановлено, що фібра X-Mesh здатна залучати додаткову кількість повітря, що призводить до зниження середньої густини бетону на 3 %, але підвищує його морозостійкість.*

***Ключові слова:** полімерна фібра, дорожній бетон, міцність за згином, міцність за стиском, діаметр волокна, дисперсне армування, структура бетону.*

---

**Abstract.** Road and airfield pavements are subject to constantly increasing vehicle loads, as well as aggressive liquid media and temperatures. Under these conditions, the search for and improvement of new types of cement concretes that are able to withstand these influences for several decades is urgent. First of all, such concretes include fiber-reinforced concrete (FRC). The article discusses the advantages and disadvantages of using various types of fiber in the technology of heavy cement concretes. Basalt or polymer fibers are most often used in road concrete. Steel fibers are not commonly used due to possible corrosion of metal fibers. The use of basalt fiber gives an effect if there is a large amount of it (more than 6 kg/m<sup>3</sup>). But this leads to difficulties in their uniform distribution in the volume of concrete mixture and increases the cost of concrete. Therefore, the use of polymer fiber is promising. It is shown that there is no consensus regarding the effectiveness of using fibers longer than 20 mm. Therefore, in the experiments, we used X-Mesh polymer fiber with lengths of 23 and 39 mm, with a fiber diameter of 100...150 μm. Experimental studies have shown that X-Mesh fibers can form a structural framework within concrete. Therefore, when this fiber is introduced into the composition of concrete, its compressive strength does not decrease, in contrast of concretes with other types of fiber. In addition, X-Mesh fiber disperse reinforces the concrete structure, which leads to an increase in flexural strength by 22 %. FRC strength studies have shown that the optimal amount of X-Mesh fiber is 1.5 kg/m<sup>3</sup>. It has also been shown that polypropylene fibers with lengths of 23 and 39 mm have the same positive effect on the properties of road concrete. It was found that X-Mesh fiber is capable of entraining an additional amount of air, which leads to a decrease the average density of concrete by 3 %, but increases its frost resistance. Despite the additional air entrainment, the water absorption of concrete does not exceed 2.5 %.

**Keywords:** polymer fiber, road concrete, flexural strength, compressive strength, a fiber diameter, dispersed reinforces, concrete structure.

**Вступ.** На дорожні та аеродромні цементобетонні покриття діють статичні та динамічні навантаження як стаціонарні, так і циклічні. Їхня інтенсивність і величина за останні два десятиліття зросли більш ніж у 10 разів. У цих умовах покриття починають руйнуватися значно раніше, ніж передбачено. Це призводить до необхідності пошуку нових матеріалів, насамперед цементобетонів, які могли б витримувати зростаючі зовнішні навантаження та експлуатуватися протягом кількох десятиліть.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Застосування фібробетону (фіброармований бетон – ФАБ (FRC)) для реконструкції покриттів в аеропортах і на автомагістралях добре відоме [1].

Зазвичай ФАБ використовують, коли припускають, що покриття піддаватиметься сильному зносу та стиранню. Додавання фіброволокон до бетонної суміші, за умови їх рівномірного розподілу, дає істотні переваги. До них належать: висока ударна

міцність і втомна міцність (impact and fatigue resistance), підвищена міцність на розтяг за згином [2], висока межа міцності на розрив, а також підвищена стійкість до тріщиноутворення при усадці [3].

Найчастіше у дорожніх покриттях застосовують базальтові чи полімерні волокна. Не так часто використовують сталеве волокно через можливу корозію. Особливо широко дослідження із застосування базальтового волокна проводять протягом останнього десятиліття [4]. Це пов'язано з його високою міцністю, високим модулем пружності, термічною та хімічною стійкістю [5]. Крім того, у [6] також згадується, що базальтові волокна легко диспергуються в бетонній суміші без сегрегації, на відміну інших видів волокон, які можуть утворювати грудки при перемішуванні. Витрата базальтової фібри, у якій досягається ефект її застосування, становить 6...24 кг/м<sup>3</sup>. Використання базальтових волокон є хорошим заміником сталевих волокон.

Проте застосування базальтових волокон у технології дорожніх ФАБ, незважаючи на їх ефективність, утруднене через необхідність вводити в бетонну суміш велику кількість фібри. Це призводить до труднощів їхнього рівномірного розподілу в обсязі бетонної суміші. Великі кількості фібри підвищують собівартість бетону.

Слід зазначити, що ефективність застосування ФАБ зазвичай оцінюється за їх впливом на механічні властивості, тоді як морозостійкість таких матеріалів є маловивченою проблемою [7]. При цьому слабо вивченим є вплив геометричних розмірів фібри як на міцність бетонів, так і на їхню морозостійкість. Є думка, що фібра довжиною 54...60 мм не надає помітного впливу на морозостійкість бетонів та їхню стійкість до дії солей [8]. Особливо це стосується поверхневого лущення бетонів при дії знакозмінних температур. Однак дослідження [9] показали, що хороші результати отримано при використанні коротких волокон довжиною 3 мм. Руйнування бетону, особливо його поверхні, під час введення таких волокон значно зменшилося. Ряд дослідників довели, що підвищення морозостійкості ФАБ з короткими волокнами може бути пов'язане з «повітряними властивостями» мікрволокон [9, 10]. У літературі є суперечливі відомості щодо цього. У статтях [11, 12] зазначено позитивний вплив на морозостійкість волокон довжиною 20...35 мм. При цьому зауважено, що додаткового залучення повітря в таких ФАБ не спостерігали.

Сприятливий вплив коротких поліпропіленових волокон (6,5 і 8 мм) на підвищення стійкості до лущення поверхні при циклічному заморожуванні та відтаванні було вказано Річардсоном [13]. Оскільки сольові лущення є поверхневими, вони не впливають на механічну цілісність бетонного тіла. Однак це пошкодження робить матеріал сприйнятливим до проникнення вологи та агресивних речовин, що загрожують міцності конструкції [14].

Тому методики випробування дорожніх бетонів на морозостійкість за наявності солей основним критерієм морозостійкості вважають втрати маси зразків від лущення.

У [7] подано результати досліджень поліпропіленової фібри різної довжини та конфігурації на морозостійкість бетону. Показано, що застосування поліпропіленових волокон спричинило збільшення міцності бетону на згин. Вища міцність на згин була у ФАБ з волокнами, поверхня яких була нерівною. Це забезпечило кращий зв'язок між волокном та цементною матрицею. Це позначилося на підвищенні морозостійкості бетонів з волокнами, які мають нерівну поверхню. Застосування волокон, які мають гладку поверхню, призвело до збільшення лущення при випробуванні на морозостійкість. Сумарна маса лущення для бетонів з гладкими волокнами була набагато більша, ніж для бетонів з нерівними волокнами. У цьому випадку збільшення вмісту гладкої фібри не привело до будь-якого поліпшення стійкості до лущення на поверхні, на відміну від нерівної фібри.

#### **Мета та завдання дослідження.**

Метою дослідження є аналіз впливу поліпропіленової фібри X-Mesh на властивості дорожнього бетону. Для досягнення сформульованої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- визначити вплив витрат фібри X-Mesh різної довжини на середню густину та міцність дорожнього бетону;
- дослідити вплив рухомості бетонних сумішей на показники якості фібробетонів;
- визначити вплив фібри X-Mesh на водопоглинання і морозостійкість дорожнього бетону.

#### **Основна частина дослідження.**

*Матеріали, що використовували у роботі.* У дослідженнях використовували цемент ПЦ І-500 Р-Н виробництва «ЮГЦемент» Філії ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна».

Для виготовлення цементобетонів дорожніх застосовували заповнювачі: гранітний щебінь фр. 5–10 мм і 10–20 мм та

кварцовий пісок з модулем крупності  $M_{кр} = 1,8$ .

У дослідженнях застосовували добавку-суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Fk 59 фірми MC-Bauchemie (Німеччина).

Склади бетону відповідали класу за міцністю на стиск не менше В30 (марка за міцністю на стиск не нижче М400). Марка за консистенцією бетонної суміші S1 (згідно з табл. 7 ДСТУ 8858 [15]).

*Експериментальні дослідження.* У наших дослідженнях вивчали вплив фібри різної довжини та конфігурації на характеристики ФАБ. В експериментах використовували поліпропіленову фібру X-Mesh довжиною 23 і 39 мм, діаметром 100...150 мкм (рис. 1). Виробник фібри – фірма ТОВ «ДПФ» м. Дніпро.



Рис. 1. Фібра X-Mesh

Фібра X-Mesh – новий вид фібри, яка здатна створювати структурний каркас для підвищення міцності бетонів на стиск, а також дисперсно армувати структуру бетону. Довжина цієї фібри 23, 39 і 54 мм. Виходячи з максимальної крупності зерен заповнювача 20 мм була обрана фібра довжиною 23 і 39 мм.

Склад цементобетонної суміші: Ц – 360 кг/м<sup>3</sup>, П – 620 кг/м<sup>3</sup>, Щ<sub>фр.5-10 мм</sub> – 430 кг/м<sup>3</sup>, Щ<sub>фр.10-20 мм</sub> – 840 кг/м<sup>3</sup>, СП Fk 59 – 0,5 % від маси цементу.

Фібру вводили у суміш сухих заповнювачів і перемішували. А потім додавали воду із суперпластифікатором і остаточно перемішували суміш. Було визначено оптимальний час перемішування вологої фібробетонної суміші – 3 хвилини.

Виготовляли зразки-балки розміром 7х7х28 см, які випробовували на міцність за згином, а потім половинки балок випробовували на міцність за стиском.

Дослідження показали, що введення до складу бетонної суміші фібри довжиною 23 і 39 мм приводить до зростання міцності бетонів за згином (табл. 1). Для бетонів з фіброю довжиною 23 мм міцність за згином зростає на 10...22 % у віці 3 і 7 діб. До 28 діб приріст міцності за згином становить 12 % порівняно з бетоном без фібри. Найкращі результати отримано при витраті фібри 1...1,5 кг/м<sup>3</sup>. Для бетонів з фіброю довжиною 39 мм приріст міцності за згином у віці 3 та 7 діб досягає 21 %, а до 28 діб знижується до 13 %. У цьому випадку найкращі результати отримані для бетонів із витратою фібри 1,5 кг/м<sup>3</sup>.

Міцність за стиском бетонів з фіброю довжиною 23 мм не нижче, ніж у бетонів без фібри. Бетони з фіброю довжиною 39 мм мають на 3...7 % більшу міцність, ніж бетони без фібри. Отримані результати підтверджують здатність фібри X-Mesh сприяти утворенню структурного каркасу, а також мікроармувати бетони.

Наші дослідження показали, що час перемішування фібробетонної суміші не робить значного впливу на міцність фібробетонів, тому у виробничих умовах при виготовленні фібробетонних сумішей досить його збільшення на 10...15 секунд, щоб перемішати фібру і щебінь або інертні заповнювачі. Можливо, що більшою мірою на міцність бетону впливає повітровтягувальна здатність фібри, яка може призводити до зниження міцності, в найбільшому ступені за стиском. З іншого боку, це може бути позитивним фактором, який дозволить зменшити витрату повітровтягувальної добавки для досягнення необхідного рівня додатково залученого повітря (4...6 %).

Таблиця 1

## Показники якості фібробетонів

№ з/п	Вид фібри	Кількість фібри, кг/м <sup>3</sup>	Середня густина бетону, кг/м <sup>3</sup>	Міцність за згином R <sub>зг</sub> , МПа, у віці, діб			Міцність за стиском R <sub>ст</sub> , МПа, у віці, діб		
				3	7	28	3	7	28
1	Без фібри	-	2461	5,0	5,9	6,9	38,5	43,4	46,7
2	23 мм	1,0	2432	5,5	6,7	7,7	37,8	43,4	47,0
3		1,5	2424	6,1	7,1	7,7	37,1	42,9	46,6
4		2,0	2413	5,5	6,6	7,5	35,1	42,0	43,5
5	39 мм	1,0	2431	5,9	6,0	7,5	42,5	45,6	48,0
6		1,5	2421	6,1	7,1	7,8	41,2	46,6	48,4
7		2,0	2409	5,5	6,7	7,7	41,8	44,7	47,4

Також оцінювали вплив рухомості бетонних сумішей на властивості бетонів. Рухомість змінювали, тому що в дорожніх бетонах застосовують два типи сумішей – марки Р1 і марки Р2...Р3. У проведених дослідженнях марка за рухомістю Р1 відповідала осадці конуса бетонної суміші ОК = 2...4 см, марка за рухомістю Р2...Р3 відповідала осадці конуса бетонної суміші ОК = 8...9 см. За рухомістю Р1 суміші виготовляють для укладання і ущільнення комплектом машин типу Wirtgen або Gomaco. За рухомістю Р2...Р3 суміші призначені для ущільнення віброрейкою або глибинними вібраторами. Обидві технології постійно застосовують для дорожніх цементобетонів.

У випробуваннях використовували фібру в кількості 1,5 кг/м<sup>3</sup>, яка є оптимальною за результатами проведених раніше експериментів. Дослідження показали, що при рухомості суміші Р1 міцність фібробетону за стиском не нижче міцності бетону без фібри (табл. 2). Проте міцність фібробетонів за згином вище міцності бетонів без фібри на 21...25 %.

Бетони з фіброю довжиною 39 мм мають міцність за згином вище, ніж бетони без фібри на 20 %, що приблизно стільки ж, як у фібробетонів з фіброю довжиною 23 мм (табл. 3). Міцність фібробетонів за стиском не нижче, ніж у бетонів без фібри.

Таблиця 2

## Показники якості фібробетонів з фіброю довжиною 23 мм із сумішей рухомістю Р1

№ з/п	Вид фібри	Кількість фібри, кг/м <sup>3</sup>	Середня густина бетону, кг/м <sup>3</sup>	Міцність за згином R <sub>зг</sub> , МПа, у віці, діб		Міцність за стиском R <sub>ст</sub> , МПа, у віці, діб	
				7	28	7	28
1	Без фібри	-	2420	4,0	5,6	40,4	48,5
2	23 мм	1,5	2390	5,0	6,8	40,9	49,9

Таблиця 3

## Показники якості фібробетонів з фіброю довжиною 39 мм із сумішей рухомістю Р1

№ з/п	Вид фібри	Кількість фібри, кг/м <sup>3</sup>	Середня густина бетону, кг/м <sup>3</sup>	Міцність за згином R <sub>зг</sub> , МПа, у віці, діб		Міцність за стиском R <sub>ст</sub> , МПа, у віці, діб	
				7	28	7	28
1	Без фібри	-	2385	4,7	5,8	38,9	48,5
2	39 мм	1,5	2360	5,6	7,0	38,2	48,1

Слід зазначити, що за результатами проведених досліджень очевидне зниження середньої густини бетонів при введенні в них фібри, причому ця закономірність зростає зі збільшенням кількості фібри у складі бетону.

Збільшення рухомості бетонної суміші з марки P1 до P2 не змінює загальної закономірності зміни міцності, встановленої для бетонів з фіброю довжиною 23 мм (табл. 4).

Слід зазначити, що зміни міцності при переході від меншої рухомості бетонних сумішей до більшої не відбулося (табл. 4, 5), що можна пояснити дією високоєфективного полікарбоксилатного суперпластифікатора Fk59.

Важливими експлуатаційними показниками дорожніх бетонів є водопоглинання, яке опосередковано визначає морозостійкість і сам показник морозостійкості.

Таблиця 4

Показники якості фібробетонів з фіброю довжиною 23 мм із сумішею рухомістю P2

№ з/п	Вид фібри	Кількість фібри, кг/м <sup>3</sup>	Середня густина бетону, кг/м <sup>3</sup>	Міцність за згином R <sub>зг</sub> , МПа, у віці, діб		Міцність за стиском R <sub>ст</sub> , МПа, у віці, діб	
				7	28	7	28
1	Без фібри	-	2440	5,0	5,8	35,7	43,3
2	23 мм	1,5	2420	5,8	6,7	36,5	43,6

Таблиця 5

Показники якості фібробетонів з фіброю довжиною 39 мм із сумішею рухомістю P2

№ з/п	Вид фібри	Кількість фібри, кг/м <sup>3</sup>	Середня густина бетону, кг/м <sup>3</sup>	Міцність за згином R <sub>зг</sub> , МПа, у віці, діб		Міцність за стиском R <sub>ст</sub> , МПа, у віці, діб	
				7	28	7	28
1	Без фібри	-	2410	4,4	5,8	38,3	45,6
2	39 мм	1,5	2400	4,9	6,2	39,3	45,3

Дослідження показали, що при витраті фібри X-Mesh в оптимальній кількості 1,5 кг/м<sup>3</sup> фібробетони мають низьке водопоглинання, на рівні 2,4...2,5 % за масою, що нижче допустимого значення 4 % (табл. 6). Слід зазначити, що показники водопоглинання і середньої густини у фібробетонів, що мають у своєму складі фібру різної довжини, однакові.

Дослідження морозостійкості показали, що фібробетони з фіброю X-Mesh різної довжини мають однакову марку за морозостійкістю F200, що відповідає мінімально допустимій марці для всієї території України (табл. 7). Мінімально допустимим коефіцієнтом морозостійкості є K<sub>мрз</sub> = 0,95.

Таблиця 6

Експлуатаційні показники фібробетонів з фіброю X-Mesh

Довжина фібри, мм	Кількість фібри, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглинання за масою W, %	Середня густина бетону, кг/м <sup>3</sup>
23	1,5	2,41	2406...2446
39	1,5	2,47	2404...2432

Морозостійкість фібробетонів з фіброю X-Mesh

Довжина фібри, мм	Кількість фібри, кг/м <sup>3</sup>	Міцність за стиском R <sub>ст</sub> , МПа, перед початком випробувань	Міцність за стиском R <sub>ст</sub> , МПа, після кількості циклів випробувань		Коефіцієнт морозостійкості після кількості циклів випробувань	
			10	20	10	20
23	1,5	48,1	45,7	45,6	0,95	0,95
39	1,5	46,4	46,7	44,4	1,01	0,96

Ці результати важливі ще й тому, що марка за морозостійкістю забезпечена в бетонах, у складі яких відсутня повітровтягувальна добавка, тобто така морозостійкість забезпечена завдяки фібрі X-Mesh.

#### Висновки

1. Показано, що в практиці дорожнього будівництва найбільш економічно застосовувати поліпропіленову фібру, здатну добре чинити опір внутрішнім і зовнішнім агресивним факторам.

2. Встановлено, що застосування поліпропіленової фібри нового типу X-Mesh довжиною 23 і 39 мм, що має здатність створювати структурний каркас усередині

бетону і при цьому дисперсно його армувати, дає змогу підвищити міцність фібробетонів за згином на 22 %. При цьому міцність бетонів з фіброю X-Mesh за стиском не знижується і може зростати на 7 % на відміну від бетонів з іншими видами фібри.

3. Визначено, що середня густина фібробетонів нижче, ніж бетонів без фібри на 1...3 %, що пояснюється повітровтягувальною здатністю фібри. Ця властивість фібри дозволяє забезпечити бетонам з фіброю X-Mesh необхідну марку за морозостійкістю без застосування повітровтягувальних добавок.

#### Список використаних джерел

1. Tehmina Ayub, Nasir Shafiq, M. Fadhil Nuruddin. Mechanical Properties of High-Performance Concrete Reinforced with Basalt Fibers. *Procedia Engineering*. 2014. № 77. P. 131–139.
2. Applications of Fiber Reinforced Concrete in Pavements. URL :<http://theconstructor.org/concrete/fibre-reinforced-concrete-in-pavements/4781/> (дата звернення: 08.12.2021).
3. Brown R., Shukla A., Natarajan K.R. 2002. Fibre reinforcement of concrete structures. Technical Report (URITC Project No. 536101) for University of Rhode Island Transportation Centre. URL: <https://cupdf.com/document/536101.html> (дата звернення: 01.12.2021).
4. Shen L. J., Xu J. Y., Li W. M., Fan F. L., Yang J. Y. Experimental investigation on the static and dynamic behaviour of Basalt fibres reinforced concrete. *Concrete*. 2008. № 4. P. 026-034.
5. Artemenko S. E. Polymer composite materials made from carbon, Basalt, and glass fibres. Structure and properties. *Fibre Chemistry*. 2003. № 35(3). P. 226–229.
6. Brik V., Ramakrishnan V., Tolmare N. Performance evaluation of 3-D Basalt fibre reinforced concrete & Basalt rod reinforced concrete. *Final Report for Highway IDEA Project 45*. 1998. 97 p.
7. Piotr Berkowskia, Marta Kosior-Kazberuk. Effect of fiber on the concrete resistance to surface scaling due to cyclic freezing and thawing. *Procedia Engineering*. 2015. № 111. P. 121–127.
8. Pigeon M., Pleau R., Azzabi M., Banthia N. Durability of microfiber-reinforced mortars. *Cem Concr Res*. 1996. № 26. P. 601-609.



9. Pigeon M., Talbot C., Marchand J., Hornain H. Surface microstructure and scaling resistance of concrete. *Cem Concr Res.* 1996. № 26. P. 1555-1566.
  10. Толмачев С. Н., Беличенко Е. А., Захаров Д. С. Повышение свойств дорожных бетонов введением полипропиленовой фибры. *Строительные материалы и изделия.* 2016. № 1. С. 76–79.
  11. Mu R., Miao C., Luo X., Sun W. Interaction between loading, freeze-thaw cycles, and chloride salt attack of concrete with and without steel fiber reinforcement. *Cem Concr Res.* 2002. № 32. P. 1061-1066.
  12. Niu D., Jiang L., Bai M., Miao Y. Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition. *Mat Des.* 2013. № 44. P. 267-273.
  13. Richardson A. E. Freeze/thaw durability in concrete with fibre additions. *Structural Survey.* 2003. № 21. P. 225–233.
  14. Valenza II, Scherer G.W. A review of salt scaling: I. Phenomenology. *Cem Concr Res.* 2007. № 37. P. 1007–1021.
  15. ДСТУ 8858:2019. Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови. [Чинний від 2020-07-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 20 с.
- 

Толмачов Сергій Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. ORCID: 0000-0003-1011-3861. Тел.: +38 (050) 303-68-48. E-mail: Tolmachov.serg@gmail.com.

Беліченко Олена Анатоліївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. ORCID: 0000-0002-7444-8188. Тел.: +38 (066)802-66-50. E-mail: Olena.belichenko@gmail.com.

Дядюшко Роман Вікторович, заступник директора ТОВ НВП «Стандарт». Тел.: +38 (067) 567-45-77. E-mail: info@standart-ua.com.

Tolmachov Serhii, Doct. of Science (Tech.), professor, Department of the Technology of Road Building Material, Kharkov national automobile und highway university. ORCID: 0000-0003-1011-3861. Tel.: +38(050) 303-68-48. E-mail: Tolmachov.serg@gmail.com.

Belichenko Olena, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher, Department of the Technology of Road Building Material, Kharkov national automobile und highway university. ORCID: 0000-0002-7444-8188. Tel.: +38 (066) 802-66-50. E-mail: Olena.belichenko@gmail.com.

Diadiushko Roman, Deputy Director, Research and Production Enterprise Standart LLC. Tel. + 38 (067) 567-45-77. E-mail: info@standart-ua.com.

Статтю прийнято 13.12.2021 р.

УДК 621.431:62-713.3:004.92

**МОДЕЛЮВАННЯ, КОНСТРУЮВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ СИСТЕМИ  
ОХОЛОДЖЕННЯ ДВЗ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ**

Кандидати техн. наук В. М. Чередніков, О. В. Череднікова

**MODELING, DESIGN AND TESTING TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE  
HELICOPTER INTERNAL COMBUSTION ENGINE COOLING SYSTEM**

PhD (Tech.) V. Cherednikov, PhD (Tech.) O. Cherednikova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256607>

---

***Анотація.** У статті наведено послідовність 3D-моделювання, конструювання та випробовування системи охолодження ДВЗ гелікоптера з метою розширення меж його застосування на країни з тропічним кліматом. Основним завданням при цьому було підвищення ефективності системи охолодження ДВЗ за рахунок збільшення тепловідведення від нього. Конструктивно це здійснювалось збільшенням повітряного потоку через радіатор більш потужними вентиляторами з ефективними лопатями та застосуванням радіатора з підвищеною тепловіддачею. Виходячи з доступності компонентів системи охолодження на сучасному ринку було запропоновано два варіанти її конструктивного рішення. За результатами моделювання і конструювання були проведені випробування обох варіантів для визначення найбільш ефективного з них. У подальшому планувалося провести випробування гелікоптера з новою системою охолодження в умовах тропічного клімату.*

***Ключові слова:** система охолодження, двигун, 3D-модель, 3D-моделювання, вентилятор, радіатор, гелікоптер.*

***Abstract.** During the operation of the helicopter in tropical climate (African countries) showed that the water cooling system of the helicopter engine was worked inefficiently in the hover mode or at high outdoor temperatures. Inefficiency is a limitation of hovering time or time of horizontal flight. As a result, the flight had to be interrupted due to heating of the engine to a critical temperature. In order to safely operate the helicopter in conditions of heightened air temperatures, it was necessary to upgrade the engine cooling system.*

*In the article, the sequence of 3D modeling, design and testing of the cooling system of the internal combustion engine (ICE) of a helicopter is presented with the aim of increasing the limits of its application in countries with a tropical climate. The main purpose was obtaining more efficient cooling system of the ICE by increasing in heat removal from it. It was done constructively by increasing the air flow through the radiator by more powerful fans with efficient blades and by using of a radiator with high heat transfer. Based on the availability of cooling system components in the modern market, two variants of its design solution were proposed.*

*The creation of a new cooling system went in two stages: a preliminary design and a prototype (working design) for two design options: the first cooling system with TEMIC fans and the second cooling system with SPAL fans. At the first stage, the possibility of installing these systems on a helicopter was determined, and in the second stage, detailed 3D modeling was created to make working drawings.*

*After the production of variants of the new cooling system and their installation on helicopters. The next step the testing were consisted of 3 stages: verification of the efficiency and effectiveness of the variants of the new cooling system; determination of the maximum cooling capacity of variants of the new cooling system; checking the efficiency and functionality of the automatic engine temperature control unit.*

*The most effective of both options was found by the results of their modeling, design and testing. Subsequently, it version of the cooling system was applied to the helicopter. That allowed increasing the upper limit of operating temperatures to plus 45°C.*

**Keywords:** cooling system, engine, 3D model, fan, radiator, helicopter.

**Вступ.** Досвід експлуатації гелікоптерів з ДВЗ показав, що в умовах високих температур навколишнього середовища тропічного клімату система водяного охолодження двигуна працює недостатньо ефективно. Це виявлялося в обмеженні часу висіння або горизонтального польоту, після чого їх доводилося переривати через нагрівання двигуна до максимально допустимої температури.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних наукових дослідженнях приділяється значна увага дослідженню, моделюванню та конструюванню двигунів, які працюють на комбінованих видах палива, особливо гібридним двигунам [14–16]. Теплопередачу всередині циліндрів та крізь його стінки для ДВЗ (двигунів внутрішнього згорання) досліджували автори Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Тимченко І. І., Нікіпчук С. В., Гащук П. М. [7, 8], [1–6]. Засобами модельних розрахунків визначали теплопередачу ДВЗ у працях [9, 10]. Визначенню енергетичної ефективності двигунів присвятили свої наукові роботи Гащук П. М., Нікіпчук С. В. [11]. Напряму впливу енергетичної ефективності двигунів на екологічні аспекти їх роботи висвітлено в статтях [12, 13].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження було вирішення проблеми недостатнього охолодження ДВЗ гелікоптера при його експлуатації в тропічному кліматі.

Основними завданнями дослідження були: 3D-моделювання і конструювання двох варіантів нової системи охолодження (далі – СО), їх виготовлення і перевірка

ефективності в умовах наземних і льотних випробувань на всіх режимах.

**Основна частина дослідження.** У випадках, коли необхідно змінити існуючу конструкцію СО ДВЗ під нові умови експлуатації, ми зазвичай використовуємо сучасні методи тривимірного моделювання та конструювання, але перевіряємо ефективність прийнятих рішень шляхом проведення експериментальних досліджень.

Існуюча СО, що серійно встановлюється на гелікоптер (рис. 1), складається з вентиляторів 2123-1308008 фірми ВАЛЕЕ-95 (Росія) і алюмінієво-пластикового радіатора NISSENS 62727A (Данія).

Аналіз конструкції та характеристик існуючої СО показав, що збільшення потужності вентиляторів призведе до підвищення навантаження на систему електричного живлення гелікоптера, особливо в моменти вмикання вентиляторів, а тому було прийнято рішення використовувати у новій СО вентилятори з безколекторними двигунами. Такі двигуни мають плавне розкручування ротора, яке керується окремими блоками управління, що послідовно перемикають полюси статора, а тому у моменти вмикання їх пусковий струм дорівнює нулю. Ця перевага також є і їх недоліком, у тому випадку, коли вентилятори використовуються у СО, тому що повільне розкручування вентиляторів до номінальних обертів буде призводити до того, що температура ДВЗ під час розкручування ще буде підвищуватися деякий час. Цьому недоліку необхідно приділяти певну увагу і враховувати при моделюванні процесів охолодження.

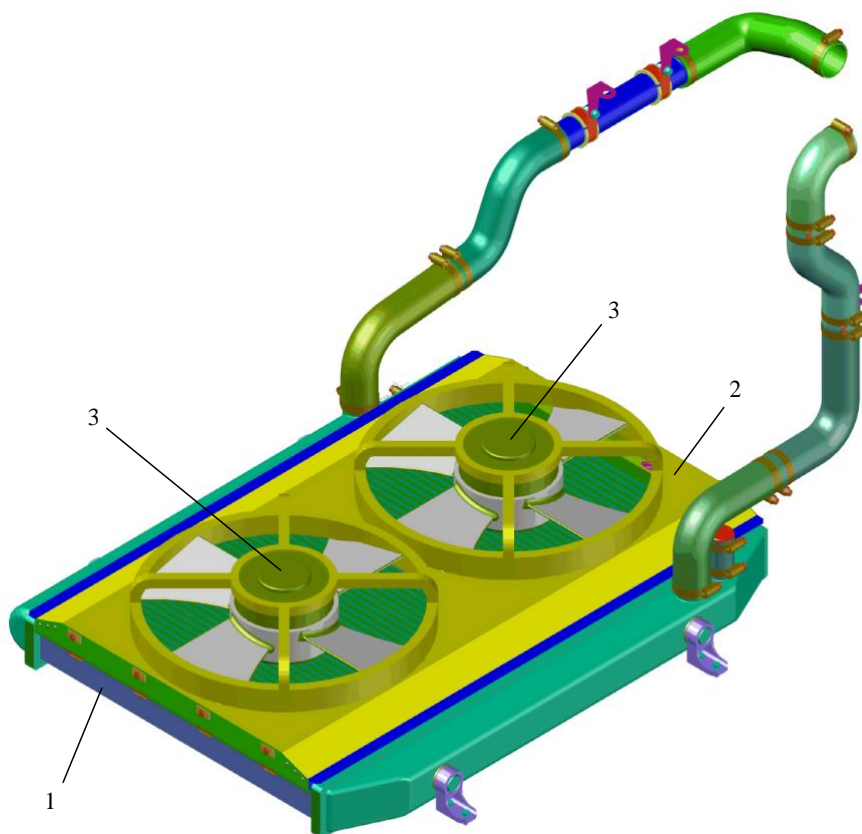


Рис. 1. 3D-модель існуючої СО, що серійно встановлюється на гелікоптер:  
1 – радіатор NISSENS 62727A; 2 – дифузор; 3 – вентилятор 2123-1308008

Аналіз сучасного ринку показав, що для модернізації СО найбільш доступними та перспективними компонентами будуть:

– радіатор Nissens 60427;

– вентилятори фірм TEMIC, LUEFTER або BOSCH з позначеннями 3D 0959 453F, 3D 0959 453G, 3D 0959 453E або 3D 0959 453D, що встановлюються на автомобіль WV Phaeton. Ці вентилятори мають повністю аналогічну будову, а тому в подальшому будемо називати їх TEMIC;

– вентилятор SPAL VA116-ABL505P-105A (далі – SPAL).

Радіатор 60427 (60427A) фірми NISSENS, який планувалося застосувати у варіантах нової СО, був повністю алюмінієвим, на відміну від раніше застосованого радіатора NISSENS 62727A. Він також має меншу вагу, збільшену на 27 % площу поверхні охолодження і вміщує

більше охолоджувальної рідини. Порівняльні характеристики обох радіаторів наведені в табл. 1.

До переваг і недоліків нових вентиляторів слід віднести:

– вентилятори TEMIC (рис. 2) мали компактнішу будову за висотою, напрямком повітряного потоку збігався з напрямком потоку існуючої СО, але блоки керування двигунами вентиляторів розташовувалися окремо і потребували додаткового місця на СО (рис. 4 і 6), що робило її важкою і не технологічною;

– вентилятор SPAL (рис. 3) мав обернений до існуючої СО напрямком повітряного потоку, більш ефективний профіль лопатей і вбудовані у двигуни блоки керування. Обернений напрямком повітряного потоку призводив до того, що основну частину вентилятора доводилося



розміщувати усередині дифузора, що збільшувало його висоту і висоту всієї СО (рис. 5 і 7) і ускладнювало розміщення нової СО у тому самому місці, де існуюча.

Крім блоку керування двигуном вентилятора, для зміни швидкості його обертання, необхідно використовувати керований генератор, який залежно від температури охолоджувальної рідини генерує сигнали різної шпаруватості. За

величиною шпаруватості блок керування двигуном встановлює необхідну швидкість його обертання. Порівняльні характеристики вентиляторів наведені в табл. 2. Подальша розробка нової СО йшла двома етапами – ескізний проект і дослідний зразок (робочий проект), для двох варіантів конструктивних рішень – СО з вентиляторамі TEMIC і СО з вентиляторамі SPAL.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики радіаторів NISSENS P / N 60427 (60427A) і 62727A

NISSENS P / N	60427A (60427)	62727A
Конструкція радіатора		
Вага, кг	7,50	8,99
Матеріал	Алюміній / Алюміній	Пластик / Алюміній
Габаритні розміри (довжина × висота × товщина), мм	845 x 630 x 145	980 x 585 x 119
Розміри сердечника (довжина × висота × товщина), мм	725 x 480 x 40	426 x 669 x 40
Об'єм, л	13,9	11,4
Площа поверхні охолодження, м <sup>2</sup>	1,4	1,1

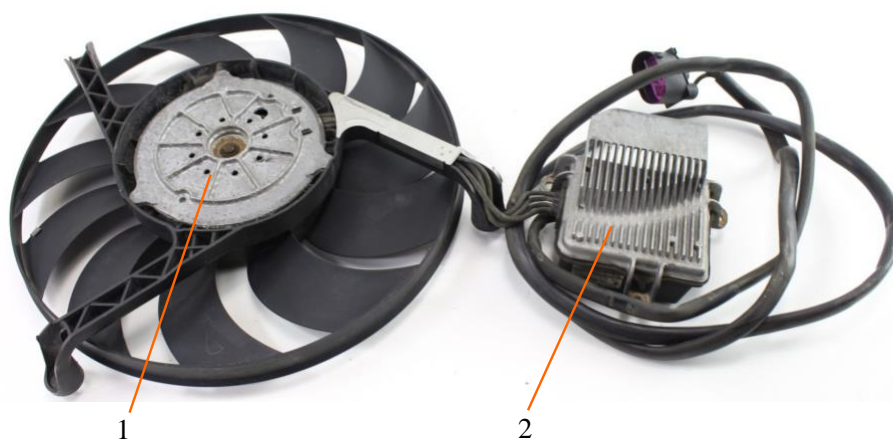


Рис. 2. Вентилятор 3D 0959 453D (3D 0959 453E) фірми TEMIC СО серії 1-3.71.80:  
1 – двигун вентилятора; 2 – блок керування двигуном

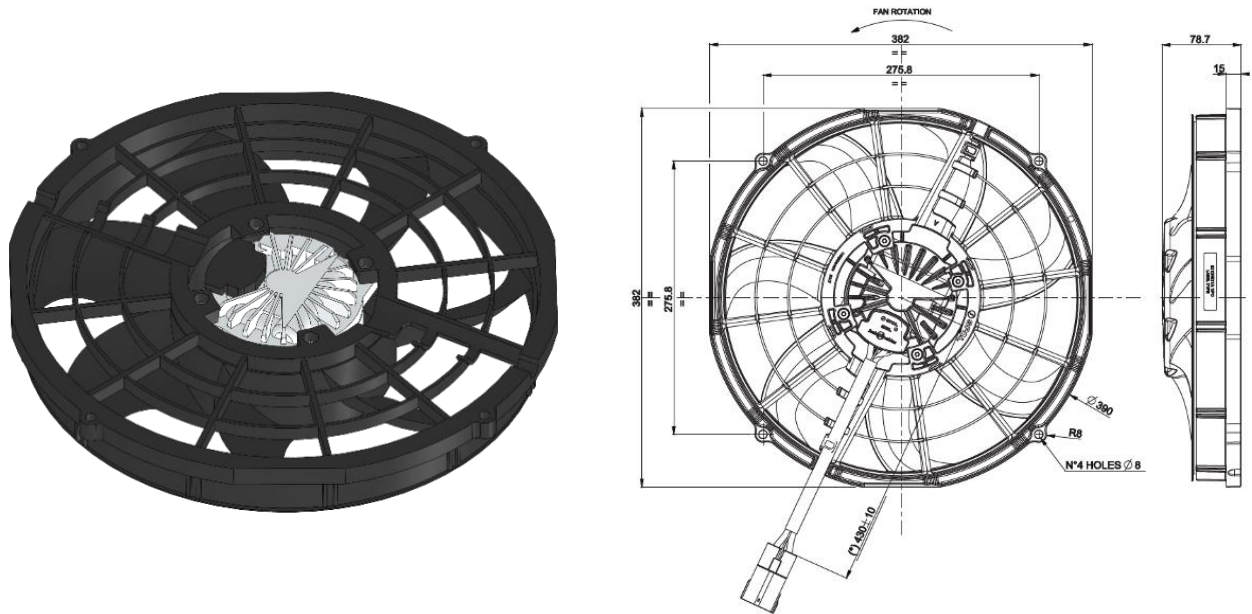


Рис. 3. Вентилятор VA116-ABL505P-105A фірми SPAL CO серії 1-3.71.80

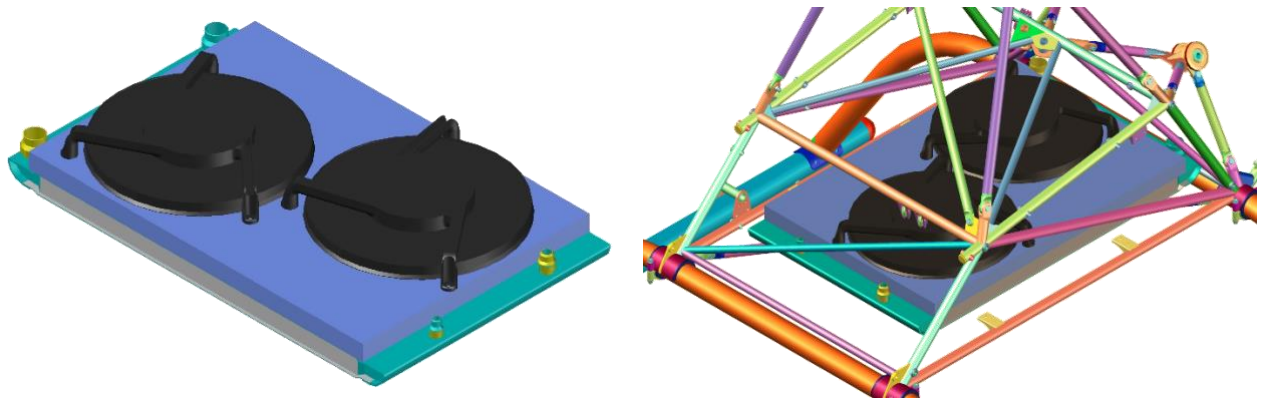


Рис. 4. Ескізний проект нової системи охолодження з вентиляторами TEMIC

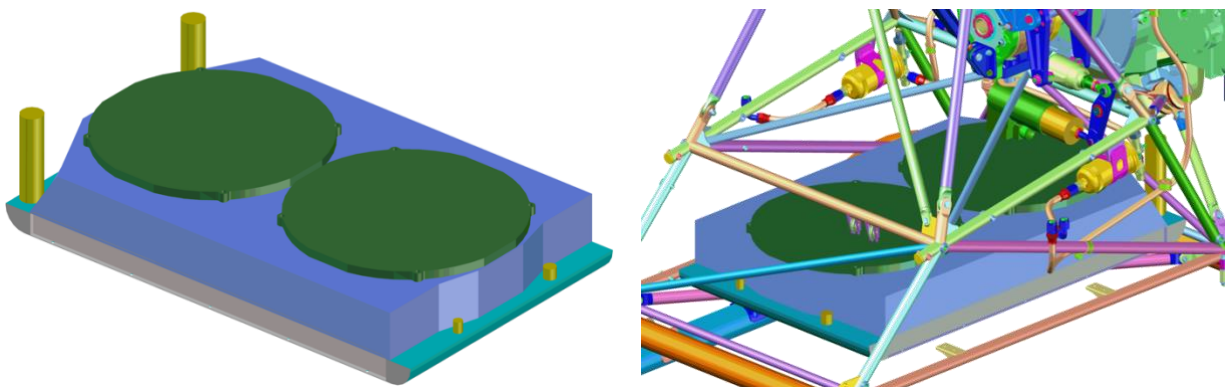


Рис. 5. Ескізний проект нової системи охолодження з вентиляторами SPAL

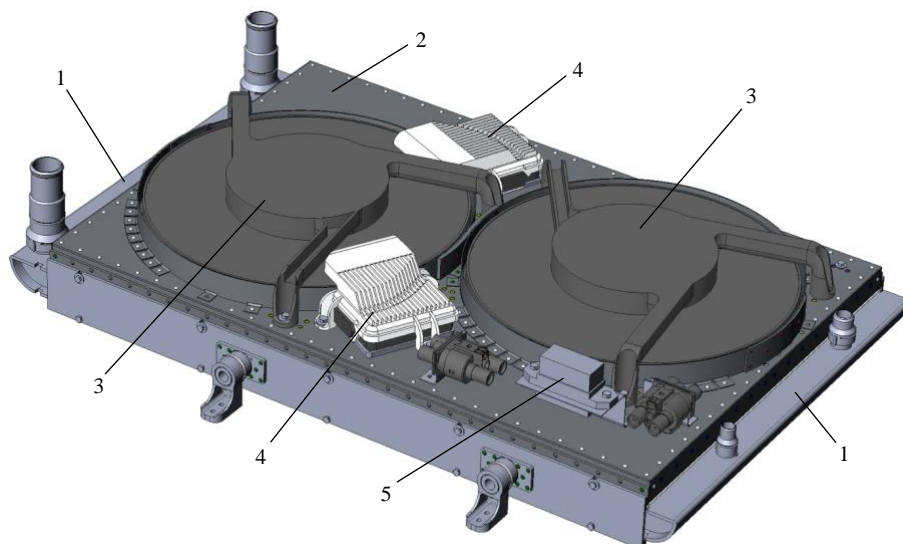


Рис. 6. 3D-модель дослідного зразка нової СО з вентиляторами TEMIC:  
1 – радіатор NISSENS 60427; 2 – дифузор; 3 – вентилятор TEMIC; 4 – блок керування двигуном вентилятора; 5 – блок запобіжників

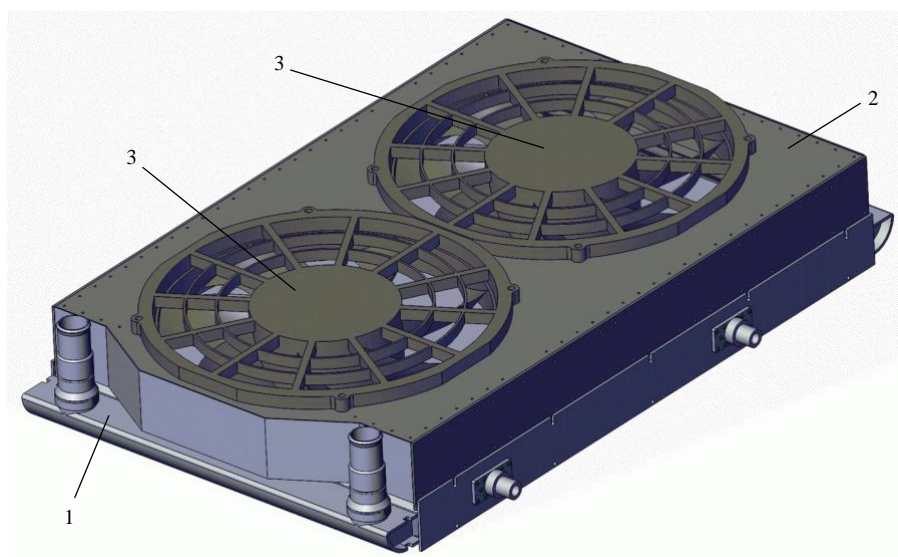


Рис. 7. 3D-модель дослідного зразка нової СО з вентиляторами SPAL:  
1 – радіатор NISSENS 60427; 2 – дифузор; 3 – вентилятор SPAL





На першому етапі, базуючись на габаритних розмірах компонентів СО, були розроблені ескізні проекти нової СО з вентиляторами TEMIC (рис. 2) і з вентиляторами SPAL (далі – SPAL) (рис. 3) і визначено можливість установлення цих систем на гелікоптер.

Варіанти нової СО двигуна (див. рис. 4 і 5) конструктивно виконані за тією самою

схемою, що і існуюча СО, і складаються з повітряно-рідинного радіатора 1 і двох вентиляторів 3. На радіатор 1 встановлюється дифузор 2, на який монтується вентилятори 3. Основною відмінністю варіантів нової СО від існуючої є застосування більш потужних вентиляторів і радіатора.

Таблиця 2

Порівняльні характеристики вентиляторів серійної і нової СО

Фото	Продуктивність	Позначення (марка)	Потужність живлення, В	Струм, А	Потужність, Вт	Продуктивність, м <sup>3</sup> /год	Напір, Па	Діаметр крильчатки, мм	Вага, кг	Тип двигуна
	ВАЛБЕ-95, Росія	2123-1308008	12	25	300	2100	150	320	1,9	Колеторний
	LUEFTER, TEMIC або BOSCH	3D 0959 453G 3D 0959 453F	12	54	650	≈4000	150	360	4,0	Вентильний (безколлекторний)
	LUEFTER, TEMIC або BOSCH	3D 0959 453E 3D 0959 453D	12	37,5	450	≈3000	150	360	4,0	Вентильний (безколлекторний)
	SPAL, Італія	VA116- ABL505P- 105A	12	41,5	500	3300	150	355	2,8	Вентильний (безколлекторний)



На другому етапі, під час детального 3D-моделювання дослідних зразків, особливу увагу було приділено герметизації стиків між радіатором і дифузорами. Для цього між ними прокладалася клейка герметизуюча стрічка, яка додатково фіксувалася від переміщень дифузором.

На гелікоптері реалізована двоступенева система підтримки необхідної температури двигуна. Для підключення нової СО до існуючої системи був розроблений новий блок автоматичного регулювання температури двигуна (далі – БАРТД), який керував швидкістю обертання вентиляторів, оскільки існуюча система була розрахована на застосування колекторних двигунів. Для нової СО також довелося переобладнати електричну систему гелікоптера через збільшення потужності вентиляторів. Для забезпечення їх нормальної роботи існуючий генератор було замінено на більш потужний з максимальним струмом навантаження 130 А.

Після виготовлення варіантів нової СО, їх монтажу на гелікоптерах та переробки електричної системи перейшли до їх випробувань. Самі випробування склалися з трьох етапів:

– 1-й етап. Перевірка працездатності і ефективності варіантів нової СО в наземних випробуваннях у складі гелікоптера;

– 2-й етап. Визначення максимальної охолоджувальної здатності варіантів нової СО;

– 3-й етап. Перевірка працездатності і функціональності БАРТД.

Для кожного з етапів були розроблені відповідні програми досліджень.

За умовами програм перших двох етапів випробування проводилися на двох гелікоптерах, що обладнані існуючою СО і одним із варіантів нової СО. На цих етапах варіанти нової СО не були обладнані БАРТД, а тому на обох гелікоптерах електрична система була перероблена таким чином, що вмикання і вимикання вентиляторів відбувалося тільки при вмиканні і вимиканні другого ступеня охолодження. При цьому вентилятори вмикалися на повну

потужність. Перший ступінь охолодження на обох гелікоптерах був не задіяний.

Для сповіщення про моменти вмикання і вимикання вентиляторів у кабінку був виведений відповідний індикатор. Вмикання вентиляторів відбувалося при 85 °С, а вимикання – при 80 °С. Фіксацію даних здійснювали за показниками мотор-тестера S7000 і відеокамерою.

Для визначення ефективності СО використовувалися такі показники: час, що минув з моменту вмикання живлення вентиляторів до початку охолодження; тривалість періоду охолодження після вимикання живлення вентиляторів; період циклу вмикання-вимикання живлення вентиляторів або період циклу нагрівання-охолодження; тривалість нагрівання; тривалість охолодження; максимальний перепад температур; середня швидкість нагрівання; середня швидкість охолодження; швидкість охолодження в сталому режимі; мінімальна досягнута температура.

Методика 1-го етапу випробувань полягала в тому, що протягом п'яти циклів нагрівання-охолодження замірялися тривалість циклу і температура двигуна. На підставі отриманих даних проводився аналіз ефективності СО. Додатково вимірювався струм, що споживався вентиляторами, з метою визначення їх ефективності щодо навантаження.

Основна відмінність методики випробувань 2-го етапу від 1-го полягала в тому, що після п'яти циклів нагрівання-охолодження вентилятори СО примусово вмикалися на повну потужність. При цьому циклічне вмикання-вимикання вентиляторів припинялося і температура двигуна починала безперервно знижуватися, поки не зупинялася на певному значенні, що характеризує максимальну охолоджувальну здатність СО.

Методика 3-го етапу була аналогічною до методик перших двох етапів, з тією різницею, що додатково перевірялася працездатність БАРТД і робота СО в цілому з цим блоком.

На першому етапі було випробувано варіант нової СО з вентиляторами ТЕМІС, оскільки його змонтували раніше. Нижче наведені результати випробувань 1-го етапу і їх аналіз.

Об'єктами випробувань були: гелікоптер, обладнаний варіантом СО з вентиляторами ТЕМІС, і гелікоптер, обладнаний існуючою серійною СО.

Умови проведення випробувань:

- температура навколишнього повітря – мінус 1 °С;
- відносна вологість – 100 %.

Результати випробувань 1-го етапу відображені на графіках зміни температури двигуна для обох СО (рис. 8). Для докладного аналізу роботи нової СО був побудований збільшений графік зміни температури двигуна, що відображає один цикл нагрівання-охолодження (рис. 9). Про вмикання і вимикання СО сигналізували відповідні індикатори червоного кольору, що позначені на рис. 8 червоними пунктирними лініями. Моменти вмикання і вимикання вентиляторів також контролювалися по записаному відео.

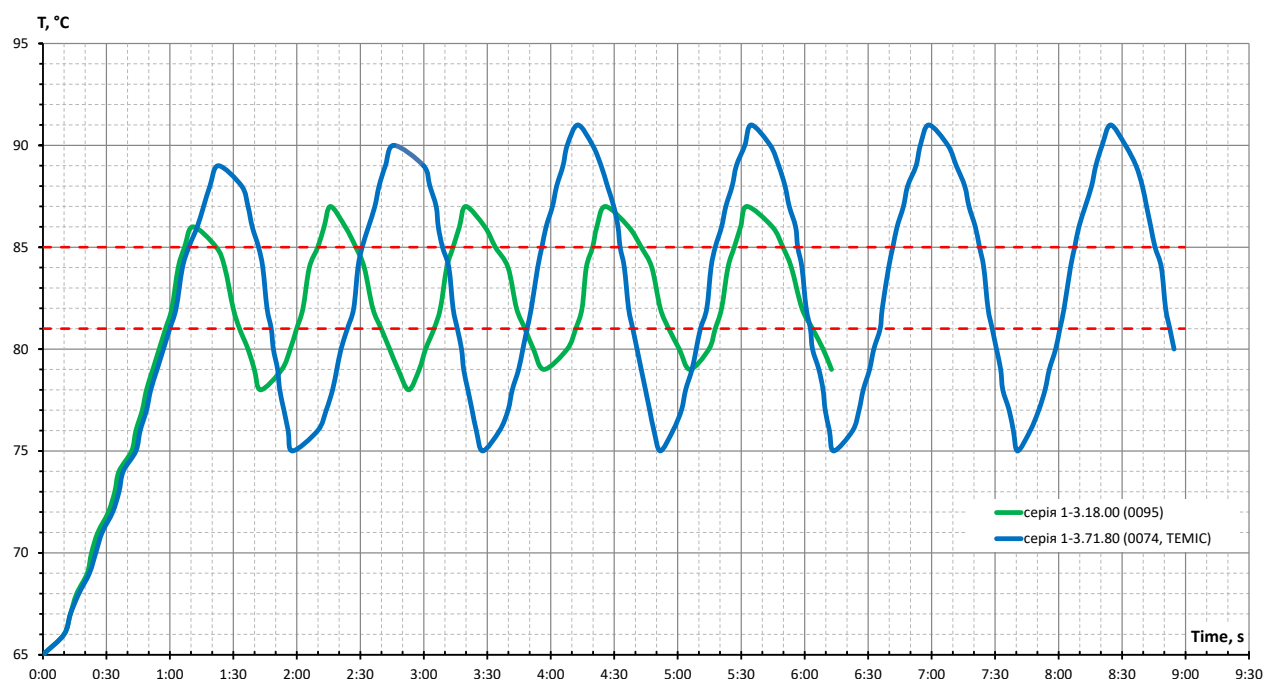


Рис. 8. Порівняння характеристик існуючої СО з варіантом нової СО з вентиляторами ТЕМІС за результатами 1-го етапу випробувань

Аналіз графіків (рис. 8 і 9) і відео показує, що при 85 °С відбувалося вмикання вентиляторів, після чого температура двигуна продовжувала зростати і досягала максимуму у 87 °С для існуючої СО і 91 °С для варіанта нової СО з вентиляторами ТЕМІС. По досягненні максимуму температура двигуна починала падати і при досягненні 81 °С вентилятори відключалися.

Після відключення вентиляторів падіння температури двигуна тривало, в результаті чого мінімальна температура двигуна знижувалася до 79 °С для існуючої СО і до 75 °С для варіанта нової СО з вентиляторами ТЕМІС. По досягненні мінімуму температура двигуна починала зростати і цикл нагрівання-охолодження повторювався.

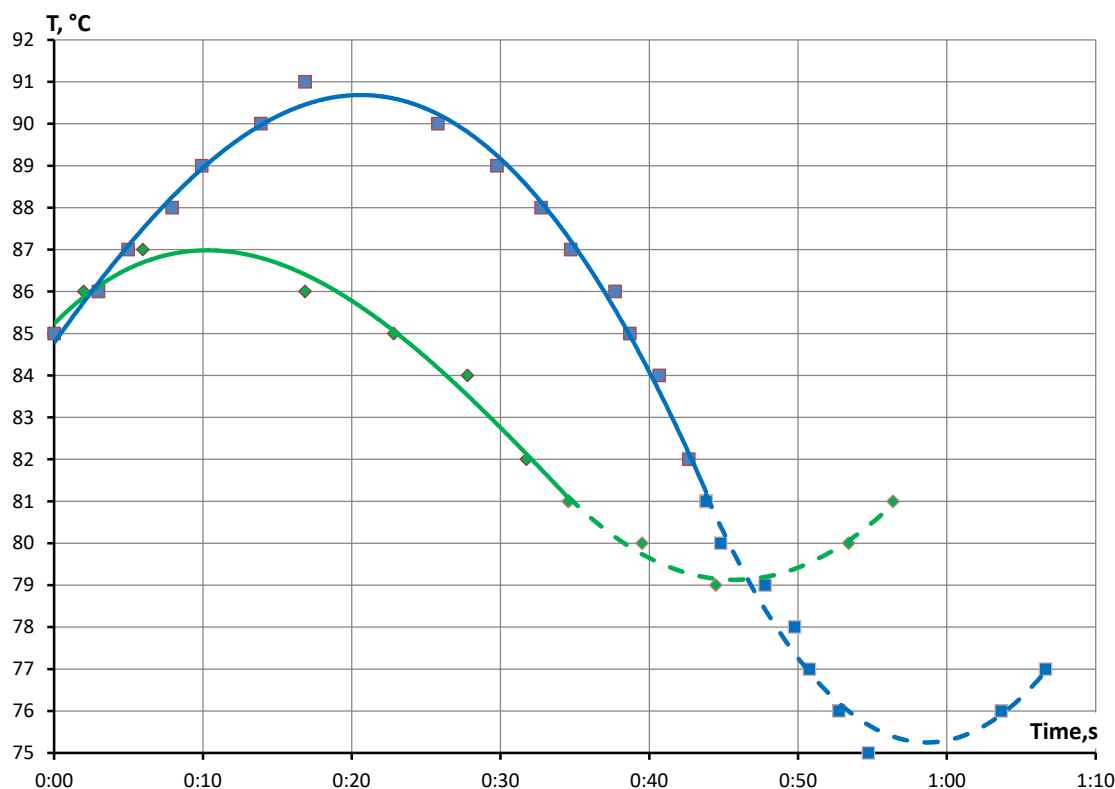


Рис. 9. Аналіз циклу нагрівання-охолодження для існуючої СО і варіанта нової СО з вентиляторами TEMIC

Проведені випробування показали, що нова СО має такі переваги, порівняно із серійною:

- збільшений період циклу нагрівання-охолодження (87 с проти 67 с);
- збільшений перепад температур (16 °C проти 8,5 °C);
- збільшена швидкість охолодження (0,4 °C/c проти 0,2 °C/c);
- зменшена середня швидкість нагрівання (0,30 °C/c проти 0,36 °C/c);
- збільшена інерційність при нагріванні-охолодженні;
- зниження навантаження на електричну систему за рахунок плавного розкручування вентиляторів.

Збільшена інерційність нової СО виявлялася як у збільшеній тривалості циклу нагрівання-охолодження, так і у збільшеній тривалості часу, протягом якого відбувалося охолодження двигуна після вимкнення вентиляторів. У новій СО цей інтервал дорівнював 12 с; у серійної СО –

10 с. При цьому мінімальна досягнута температура для нової СО дорівнювала 75 °C, а для серійної – 79 °C.

До недоліків нової СО слід віднести збільшений період часу між моментом подачі живлення на вентилятори і моментом початку охолодження (17 з проти 6 с), що зумовлений особливостями роботи безколекторних двигунів вентиляторів. Так, після подачі напруги на двигун вентилятора, система керування двигуном проводить самотестування і пошук керуючого сигналу, після чого починає плавне розкручування вентилятора. Затримка між подачею напруги на двигун і початком розкручування вентилятора становила близько 4,5 секунди. Розкручування вентилятора до максимальних обертів тривало ще 20 секунд. У підсумку це призводило до того, що вентилятори починали охолоджувати двигун тільки через 17 секунд після початку подачі на них напруги, що призводило до закидання

максимальної температури до 91 °С, проти 6 секунд і закидання до 87 °С в існуючій СО.

Цю проблему можна вирішити, якщо застосувати у СО БАРТД. При цьому зникає затримка між подачею напруги на двигун і початком розкручування вентилятора, а час його розкручування до необхідних обертів значно знижується.

Аналіз результатів випробувань показав, що:

- робота нової СО була циклічною і складалася з періодів нагрівання та охолодження;

- тривалість цих періодів визначалася температурами вмикання і вимикання вентиляторів;

- температури вмикання і вимикання вентиляторів відповідали наперед визначеним величинам;

- нова СО ефективніша за серійну: двигун охолоджується швидше, а нагрівається повільніше; тривалість циклу нагрівання-охолодження і перепад температур при охолодженні у новій СО більше;

- внаслідок особливостей конструкції двигунів вентиляторів і обраного варіанта їх підключення до електричної мережі гелікоптера, при роботі нової СО виникають закиди температур, які можна усунути за допомогою БАРТД.

На другому етапі випробування проводилися одночасно на двох гелікоптерах, що були обладнані варіантом нової СО з вентиляторами ТЕМІС і існуючою СО. Вимоги до обладнання, його складу і підключення були такими самими, як і на попередньому етапі.

Умови проведення випробувань:

- температура навколишнього повітря – мінус 2 °С;

- відносна вологість – 70 %.

Результати випробувань 2-го етапу відображені на графіках зміни температури двигуна для обох СО (рис. 10). Як і раніше, про вмикання і вимикання СО сигналізували відповідні індикатори, а температура двигунів визначалася за показниками мотор-тестера S7000 із записаного відео.

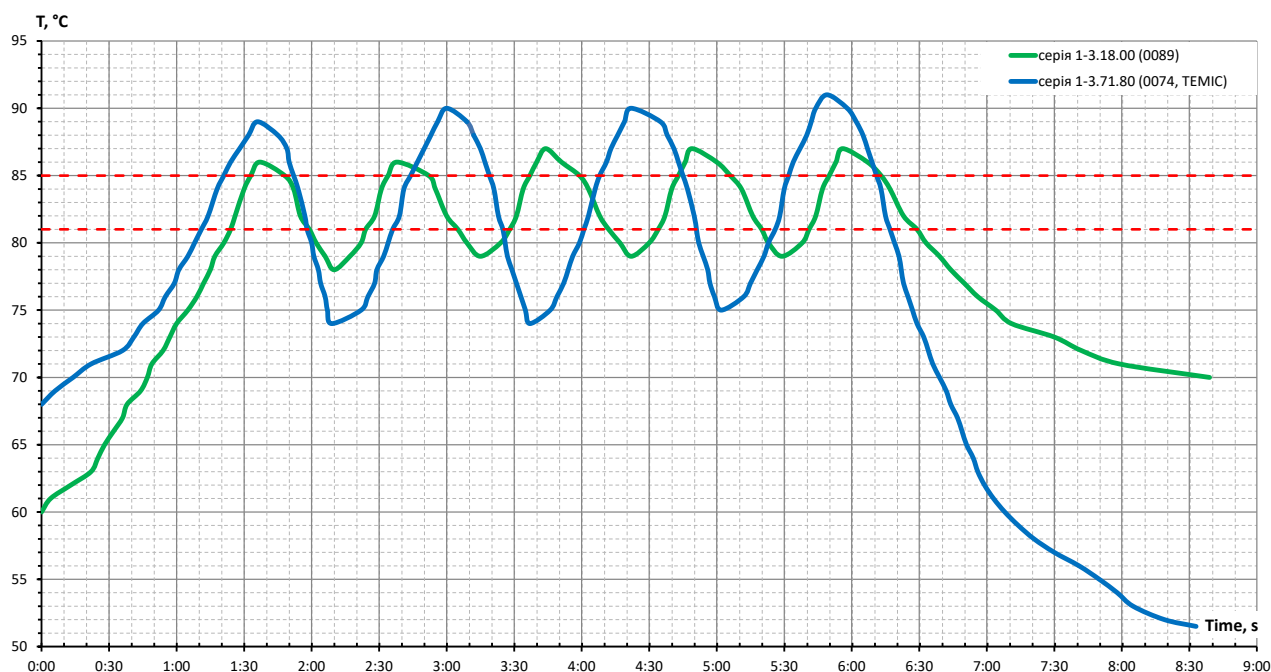


Рис. 10. Порівняння характеристик існуючої СО з варіантом нової СО з вентиляторами ТЕМІС на 2-му етапі випробувань

На графіках (рис. 10) можна побачити як циклічну роботу вентиляторів, так і їхню роботу при максимальній потужності. З аналізу графіків випливає, що існуюча СО при її вмиканні на повну потужність здатна охолодити двигун до 70 °С, у той час як варіант нової СО з вентиляторами ТЕМІС – до 51,5 °С. Різниця температур у 18,5 °С свідчить про значно кращу охолоджувальну здатність нової СО. Характер роботи нової та існуючої СО при циклічному вмиканні вентиляторів не відрізнявся від характеру

роботи СО, що був описаний на попередньому етапі випробувань.

Третій етап випробувань проводився після розробки і монтажу БАРТД. Керування швидкістю обертання вентиляторів ґрунтувалося на алгоритмі двоступеневого регулювання температури двигуна, що раніше використовувався на гелікоптері. Параметри регулювання і відповідні їм швидкості обертання вентиляторів вказані у табл. 3.

Таблиця 3

Параметри двоступеневого регулювання температури двигуна

Ступінь	Температура вмикання, °С	Температура вимикання, °С	Швидкість обертання вентилятора, % від max
1	75	70	50
2	85	80	100

Випробування проводилися для обох варіантів нової СО – як з вентиляторами ТЕМІС, так і з вентиляторами SPAL, що були обладнані БАРТД.

Для проведення випробувань кожний з гелікоптерів був обладнаний двома індикаторами, які сигналізували про вмикання або вимикання першого або другого ступенів охолодження. Індикатори розташовувалися в кабіні гелікоптера. Зелений індикатор відповідав вмиканню першого ступеня, а червоний – другого. В іншому вимоги та склад обладнання залишалися такими самими, як і на двох попередніх етапах.

Умови проведення випробувань:

1-й день (випробування СО з вентиляторами ТЕМІС):

- температура навколишнього повітря – плюс 17 °С;

- відносна вологість – 20 %.

2-й день (випробування СО з вентиляторами SPAL):

- температура навколишнього повітря – плюс 10 °С;

- відносна вологість – 85 %.

Результати випробувань 3-го етапу наведені на графіках зміни температури двигуна для варіантів нової СО з вентиляторами ТЕМІС і SPAL (рис. 11). Аналіз цих графіків показує, що при використанні вентиляторів ТЕМІС вони циклічно вмикаються і вимикаються. У роботі по черзі беруть участь обидва ступені охолодження, оскільки охолодження тільки першим ступенем недостатньо. Температури вмикання і вимикання вентиляторів відповідали встановленим значенням. При вмиканні другого ступеня охолодження температура двигуна швидко знижувалася, що свідчило про значний запас потужності розсіювання нової СО. Середня швидкість нагрівання була майже в три рази нижче середньої швидкості охолодження (0,07 °С/с проти 0,2 °С/с). Закиди по максимальній температурі були відсутні, а по мінімальній – зменшилися з 6 °С до 2 °С. Також не було затримки при вмиканні вентиляторів. Максимальний перепад температур не перевищував 7 °С. Температура двигуна не піднімалася вище 85 °С.

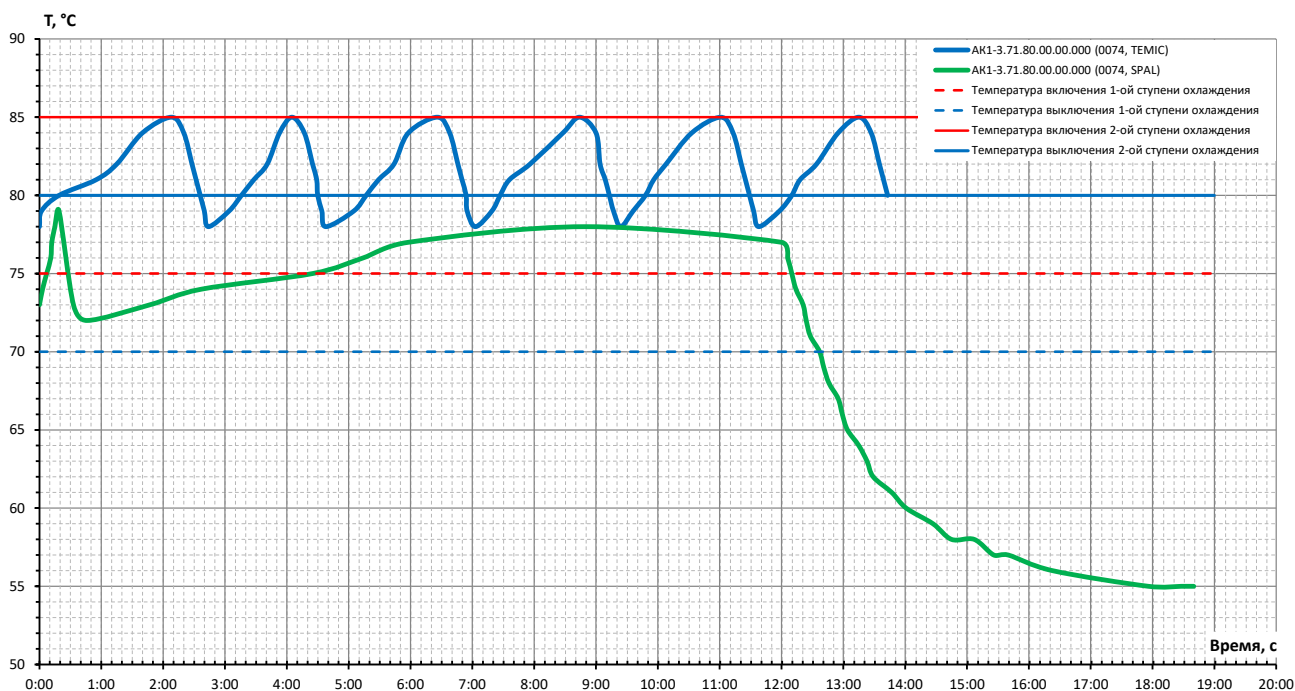


Рис. 11. Перевірка працездатності і функціональності БАРТД для варіантів нової СО з вентиляторами TEMIC і SPAL

Через погодні умови, що сформувалися на момент випробування СО з вентиляторами SPAL (температура повітря знизилася на  $7^{\circ}\text{C}$ ), робота цього варіанта відрізнялася від роботи нової СО з вентиляторами TEMIC. Був відсутній циклічний характер роботи вентиляторів: після того, як температура двигуна перевищила  $75^{\circ}\text{C}$ , увімкнувся перший ступінь охолодження і встановилася теплова рівновага – температура двигуна зросла на  $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$  і далі не підвищувалася. Необхідну температуру двигуна підтримував тільки перший ступінь охолодження. Такий режим витримали протягом 5 хвилин, а потім, для визначення максимальної охолоджувальної здатності СО, примусово увімкнули вентилятори на повну потужність. Через 6 хвилин температура двигуна знизилася до  $55^{\circ}\text{C}$  і далі не знижувалася. З огляду на те, що випробування в режимі максимальної охолоджувальної здатності нової СО з вентиляторами TEMIC проводилися при

температурі мінус  $2^{\circ}\text{C}$ , що на  $12^{\circ}\text{C}$  нижче теперішніх випробувань, можна припустити, що за однакових погодних умов мінімальна температура двигуна, в разі використання СО з вентиляторами SPAL увімкненими на повну потужність, знизилася б до  $43^{\circ}\text{C}$ . Відповідно охолоджувальна здатність СО з вентиляторами SPAL більша, ніж охолоджувальна здатність СО з вентиляторами TEMIC.

На рис. 12 виконано порівняння максимальної охолоджувальної здатності всіх СО, розглянутих вище. Для варіанта нової СО з вентиляторами SPAL виконана корекція за температурою зовнішнього повітря і додано відповідний графік.

Циклічний характер роботи нової СО з вентиляторами SPAL був у подальшому підтверджений льотними випробуваннями при більш високих температурах зовнішнього повітря. Він не відрізнявся від характеру роботи СО з вентиляторами TEMIC.

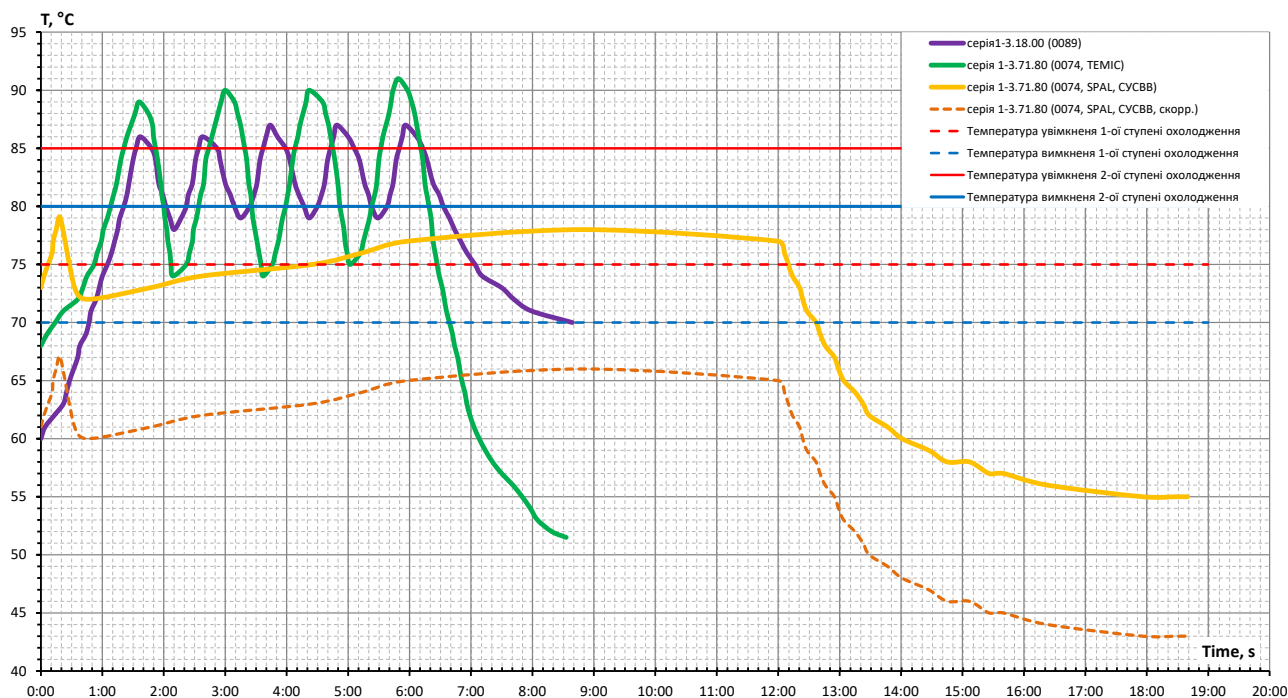


Рис. 12. Порівняння максимальної охолоджувальної здатності випробуваних СО

Аналіз роботи БАРТД показав, що:  
 - він здійснює регулювання температури двигуна відповідно до розробленого алгоритму;  
 - у результаті застосування БАРТД усунені всі описані вище недоліки нової СО;

- СО з вентиляторами SPAL ефективніша за СО з вентиляторами TEMIC;  
 - виконані всі завдання з розроблення дослідного зразка нової СО.  
 Результати випробувань усіх СО було зведено у табл. 4.

Таблиця 4

Порівняння показників ефективності різних СО

Параметр	Існ. СО	Нова СО		
		ТЕМІС		SPAL
1	2	3	4	5
<b>1. Температура навколишнього повітря, °C</b>	«-2»	«-2»	«+17»	«+10»
<b>2. Особливості конструкції</b>		2-га ст.	БАРТД	БАРТД
2.1. Час, що минув з моменту подачі живлення на вентилятори до початку охолодження, с	6	17	—	—
- затримка вмикання вентиляторів, с	0	4,5	—	—
- тривалість розкручування вентиляторів, с	3	20	10*	7*
2.2. Тривалість періоду охолодження після вимкнення живлення вентиляторів, с	10	12	9	—
2.3. Період циклів вмикання-вимкання живлення вентиляторів, с	67	84	135	∞
<b>3. Цикл нагрівання-охолодження від мінімальної до максимальної температури</b>				

Продовження табл. 4

1	2	3	4	5
3.1. Період циклу, с		84	135	$\infty$
3.2. Тривалість нагрівання, с	28	44	98	$\infty$
3.3. Тривалість охолодження, с	39	40	37	$\infty$
<b>3.4. Максимальний перепад температур, °C</b>	<b>8,5</b>	<b>16</b>	<b>7</b>	<b>0</b>
3.5. Середня швидкість нагрівання, °C/с	0,30	0,36	0,07	const
<b>3.6. Середня швидкість охолодження, °C/с</b>	<b>0,22</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0</b>
3.7. Тривалість охолодження в сталому режимі, с	19	22	18	$\infty$
3.8. Перепад температур у сталому режимі, °C	5,4	12	5	0
<b>3.9. Швидкість охолодження в сталому режимі, °C/с</b>	<b>0,28</b>	<b>0,55</b>	<b>0,28</b>	<b>const</b>
<b>4. Абсолютні показники ефективності</b>				
4.1. Мінімальна досягнута температура, °C	71	52	–	55 (43**)
4.2. Час досягнення мінімальної температури, с	150	180	–	360
<b>5. Непрямі показники ефективності</b>				
5.1. Струм, споживаний вентиляторами без навантаження, А	44	74	74	82
5.2. Струм, споживаний вентиляторами під навантаженням, А	44	74	74	82
5.3. Ефективність системи охолодження, %	100	100	100	100
5.4. Напруга живлення вентиляторів, В	13,2	12,8	12,8	14,2

\* Тривалість розкрутки вентиляторів на одному ступені охолодження.

\*\* Значення отримано шляхом корекції температури навколишнього повітря.

**Висновки.** Аналіз результатів проведених випробувань показав, що:

- робота нової СО була циклічною і складалася з періодів нагрівання та охолодження;

- тривалість цих періодів визначалася температурами вмикання і вимикання вентиляторів;

- температури вмикання і вимикання вентиляторів відповідали встановленим температурам;

- нова СО ефективніша за існуючу: двигун охолоджується швидше, а

нагрівається повільніше; тривалість циклу нагрівання-охолодження і перепад температур при охолодженні у новій СО більше;

- найбільшу охолоджувальну здатність має варіант СО з вентиляторами SPAL;

- вентилятори СО працюють як у циклічному режимі, так і в режимі максимальної потужності;

- розроблена СО двигуна була застосована на гелікоптері, що дозволило підвищити верхню межу експлуатаційних температур до плюс 45 °C.

### Список використаних джерел

1. Гащук П. М., Нікіпчук С. В. Моделювання теплообмінних процесів, що перебігають в циліндрах двигуна внутрішнього згоряння. *Пожарна безпека: зб. наук. праць*. Львів: ЛДУ БЖД, 2018. № 33. С. 15–34. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/886> (дата звернення: 06.12.2021).

2. Гащук П. М., Нікіпчук С. В. Особливості теплотворення в двигуні внутрішнього згоряння. *Автомобільний транспорт*. Харків, 2018. № 42. С. 12–21. URL: [https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/dSPACE/bitstream/123456789/2424/1/AT\\_02\\_42.pdf](https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/dSPACE/bitstream/123456789/2424/1/AT_02_42.pdf) (дата звернення: 06.12.2021).



3. Гащук П. М., Нікіпчук С. В. Особливості теплотворення в двигуні внутрішнього згоряння. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*: III Міжнародна науково-практична конференція. 14 вересня 2018 р.: матеріали конференції. Львів, 2018. С. 166.
4. Гащук П. М., Нікіпчук С. В. Стендово-аналітичні засоби моделювання теплових явищ, що перебігають у двигуні внутрішнього згоряння. *Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи підготовки фахівців*: міжнародна науково-практична конференція. 19–20 жовтня 2017 р.: наукові праці. Харків, 2017. С. 227–228.
5. Гащук П. М., Сичевський М. І., Домінік А. М. Про зміст поняття «Коефіцієнт корисної дії автомобіля». *Вісник ЛДУ БЖД*: зб. наук. праць. Львів, 2016. № 14. С. 152–175.
6. Гащук П. Н. Энергетическая эффективность автомобиля. Львов: Свит, 1992. 208 с.
7. Автомобільні двигуни: підручник / Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов, І. І. Тимченко. Київ: Арістей, 2006. 476 с.
8. Нікіпчук С. В. Аналіз та оптимізація схем суміщення структурних елементів у системах охолодження автотранспортних двигунів. *IX міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові*. 20–22 травня 2009 р.: праці. Львів, 2009. С. 271–272.
9. Гащук П. М., Нікіпчук С. В., Богачик Ю. Натурно-машинні засоби в моделюванні термодинамічних процесів, що перебігають у двигунах внутрішнього згоряння. *Динаміка, міцність та проектування машин і приладів*: вісник Державного університету «Львівська політехніка». Львів, 1998. № 354. С. 3–9.
10. Internal Combustion Engines: Performance, Fuel Economy and Emissions. London: IMechE, 2013. 254 p.
11. Гащук П. Н. Энергетическая эффективность автомобиля. Львов: Свит, 1992. 208 с.
12. Nashchuk P., Nikipchuk S. Heat generation and heat consumption in engine of rapid internal combustion. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. Львів, 2018. Vol. 4. № 1. P. 160–174.
13. Merksiz J. Ekologiczne aspekty stosowania silników spalinowych. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1995. 367 s.
14. Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. *International journal of Automobile and Mechanical Engineering*. 2017. 14(4). P. 4649–4664. URL: [http://ijame.ump.edu.my/images/Volume%2014%20Issue%204%202017/5\\_Hnatov%20et%20al.pdf](http://ijame.ump.edu.my/images/Volume%2014%20Issue%204%202017/5_Hnatov%20et%20al.pdf) (last access: 06.12.2021).
15. El-Ladan A.D., Haas O.C.L. Fan-pad evaporative dattery cooling for hybrid electric vehicle thermal management. *IET*, 2015. DOI: 10.1049/cp.2015.0901.

---

Чередніков Володимир Миколайович, кандидат технічних наук, головний конструктор ТОВ «КБ «Аерокоптер». ORCID iD: 0000-0003-1857-3942. Тел.: +38 (095) 546-80-42. E-mail: polvl@yandex.ru.

Череднікова Олександра Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0003-4684-9870. Тел.: +38 (095) 546-80-41. E-mail: al.chered108@gmail.com.

Oleksandra Cherednikova, PhD (Tech). Associate Professor, department of heat and gas supply, ventilation and heat energy, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0003-4684-9870. Tel. +38 (095) 546-80-41. E-mail: al.chered108@gmail.com.

Volodymyr Cherednikov, PhD (Tech). Chief Designer (Department of chief designer) DB Aeroicopter. ORCID iD: 0000-0003-1857-3942. Tel. +38 (095) 546-80-42. E-mail: polvl@yandex.ru.

Статтю прийнято 29.11.2021 р.

УДК 620.9:621.311

## ТЕХНОЛОГІЇ СПАЛЮВАННЯ ДЕРЕВНИХ ВІДХОДІВ У КОТЛАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Асп. Р. Л. Джиоєв

## TECHNOLOGIES OF WOOD WASTE INCINERATION IN LOW POWER BOILERS

Postgraduate student R. L. Dzhyoiev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256611>

---

**Анотація.** Наведено аналіз способів спалювання деревних відходів, відходів рослинного походження, біомаси та їх енергетичний потенціал. Вивчалися можливості реконструкції та модернізації газових котельних агрегатів України на спалювання біомаси та деревних відходів. Розроблено схему твердопаливної когенераційної енергетичної установки (міні-ТЕЦ) зі спалюванням деревних відходів.

**Ключові слова:** деревні відходи, біомаса, технології спалювання, когенерація.

**Abstract.** The analysis of ways of burning wood waste and waste of vegetable origin, biomass and their energy potential are given. Possibilities of reconstruction and modernization of gas boiler units of Ukraine about burning biomass and wood waste were studied. The scheme of solid fuel cogeneration power plant with wood waste incineration has been developed. The high energy intensity of Ukraine's GDP and the lack of its own fuel resources determine its dependence on energy supplies. Therefore, the current policy of involving local fuels and renewable energy sources (RES) in the fuel and energy balance of municipal and municipal energy. The use of wood and plant biomass waste in the housing system (boilers) will reduce the consumption of imported natural gas. Modern technologies provide efficient incineration of wood waste, but their use is determined by the characteristics of fuel and capacity of commercial boilers. The most effective methods and technologies of thermal processing of wood waste are being developed. High gas prices in 2021 are caused by rising prices for rare earth metals and other elements used in renewable energy: lithium by 400 %, silicon – 300 %, aluminum – 37 %, cobalt – 85 %, neodymium – 58 %, magnesium - 9, copper – 25 %, zinc and nickel – 25 %.

Renewable energy also needs the resources from which windmills and solar panels are made. 70 % of windmills and solar panels are made of metals and alloys and their cost will affect the cost of generating new RES capacity.

Analysis of the reasons for the increase in prices for components for RES shows that with rising prices for fossil fuels (gas, oil, coal) and increasing construction of RES, prices for lithium, cobalt and other elements increase. At the same time, rare earth reserves are limited and concentrated in several countries (China, Austria, Bolivia, Chile, Brazil, Congo) and therefore these countries have a stricter pricing policy.

**Keywords:** wood waste, biomass, combustion technologies, cogeneration.

**Вступ.** Висока енергоємність ВВП України та недостатність власних паливних ресурсів визначає залежність від постачання енергоносіїв. Тому сьогодні актуальна

політика залучення місцевих палив та відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у паливно-енергетичний баланс комунальної та муніципальної енергетики. Використання

деревних та рослинних відходів біомаси в системі ЖКГ (котельних установках) дозволить знизити споживання природного газу, що імпортується. Сучасні технології забезпечують ефективне спалювання деревних відходів, проте їх застосування визначається характеристиками палива і потужністю комерційних котельних агрегатів. Розробляються найефективніші методи та технології термічної переробки деревних відходів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Визначення біомаси як сировини для енергетичного використання міститься у Законі України «Про альтернативні види палива» [1].

У 2030 р. частка ВДЕ у системах опалення та охолодження має становити понад 36 % у країнах ЄС.

У [2] розроблено дорожню карту стратегії розвитку біоенергетики. Довгостроковий сценарій розвитку біоенергетики України вказує на досягнення не менше 60 % ВДЕ в енергобалансі у 2050 р.

Енергетичні деревні відходи включають: паливні деревини, порубкові залишки, відходи деревообробки, а також сухостій, деревини із захисних лісосмуг, відходи від обрізки та викорчовування багаторічних сільськогосподарських насаджень.

У [2] наведені дані та оцінка енергетичного потенціалу деревної біомаси в Україні (табл. 1).

Таблиця 1

Енергетичний потенціал деревної біомаси

Складові потенціалу деревної біомаси	Підходи до оцінки потенціалу
Паливна деревина	Щорічні статистичні дані (до 2018 р. статистика надавала дані з обсягу дров для опалення)
Порубкові залишки	<b>14 %</b> від об'єму заготівлі круглого лісу (до 2018 р. <b>~20 %</b> порубкових решток мало залишитися в лісі)
Відходи деревообробки	Статистичні дані (щорічні)
Сухостій	Береться запас сухоостою в лісах зі середньоквадратичною похибкою 10–15 % згідно з даними НУБіП та експертним припущенням, що лише <b>25 %</b> загального потенціалу сухоостою є технічно досяжним та економічно доцільним для утилізації протягом <b>10 років</b>
Деревина із захисних лісосмуг	Відповідно до площі полезахисних лісосмуг (ПЗЛС) та лісосмуг вздовж автомобільних доріг та залізниць, з оцінкою загального запасу деревини (вихід 150 щ.м <sup>3</sup> /га) та необхідності їх реконструкції протягом <b>10–20 років</b>
Відходи від обрізки та викорчовування багаторічних с/г насаджень	Виходячи із площі насаджень, утворення відходів (т/га) згідно з літературними даними чи польовими вимірюваннями (є відповідна методика проведення вимірювань). Обрізка: <b>2,5–3 т/га</b> ; викорчовування: <b>30 т/га</b> (протягом <b>5 років</b> )

Енергетичний потенціал біомаси становить 23 млн т н. е./р. (дані 2018 р.), у тому числі деревна біомаса становить 3,08 млн т н. е./р.

Основними складовими енергетичного потенціалу біомаси є сільськогосподарські залишки (40 %), а також енергетичні культури (32 %). В структурі енергетичного

потенціалу деревної біомаси половину займає паливна деревина.

За даними [2], енергетичний потенціал біомаси збільшиться до 45 млн т н. е./рік у 2050 р. (табл. 2).

Таблиця 2

Прогноз енергетичного потенціалу біомаси в Україні у 2050 р.

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн т	Потенціал, доступний для енергетики (економічний)	
		Частка теоретичного потенціалу, %	млн т н. е.
Солома зернових колосових культур*	49,2	30	5,04
Солома ріпаку	4,9	40	0,68
ПП кукурудзи (стебла, стрижні)*	58,1	40	4,45
ПП виробництва соняшника (стебла, корзинки)	26,9	40	1,54
Вторинні с/г залишки (лушпиння соняшника)	2,4	100	1,00
Деревна біомаса (паливна деревина, порубкові залишки, відходи деревообробки)*	12,3	96	2,88
Деревна біомаса (сухостій, деревина із захисних лісосмуг, відходи ОВБСН)	8,8	45	1,02
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,39
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	0,82
Біогаз з відходів та ПП АПК*	8,4 млрд м <sup>3</sup> СН <sub>4</sub>	83	5,92
Біогаз з ТПВ*	0,7 млрд м <sup>3</sup> СН <sub>4</sub>	70	0,42
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)*	0,4 млрд м <sup>3</sup> СН <sub>4</sub>	31	0,11
Енергетичні культури*:			
- верба, тополя, міскантус**	34,5	100	14,65
- кукурудза (на біогаз)**	7,5 млрд м <sup>3</sup> СН <sub>4</sub>	100	6,43
<b>Всього</b>	-	-	<b>45,35</b>

\* Складові потенціалу біомаси, ріст яких очікується до 2050 р. Інші складові, згідно з консервативним підходом, залишені на рівні значень потенціалу 2018 р.

\*\* За умови вирощування на 2 млн га незадіяних с/г земель.

За даними ІТНАНУ, у структурі споживання первинних енергоресурсів України частка природного газу становить 42 % (2010 р.), а в країнах ЄС – 24,5 %, частка ВДЕ становить близько 2 %.

Потенціал біомаси, доступний для виробництва в Україні, включає (млн т у. т./р.) солому зернових культур – 3,63, кукурудзу – 1,19, стебла та лушпиння соняшника – 2,31, відходи деревини – 1,59.

**Енергетичний потенціал деревних відходів.** Деревина складається з органічних речовин (до 99 % від загальної маси). Елементарний хімічний склад деревини різних порід майже однаковий. Суха деревина містить 49–50 % вуглецю, 44–45 % кисню, 5–6 % водню, 0,1–0,3 % азоту. При спалюванні деревини залишається її неорганічна частина – зола. До складу золи входить

кальцій, калій, натрій, магній та інші елементи.

У сухому вигляді основними складовими деревини є целюлоза, лігнін, геміцелюлоза, екстракти та різноманітні золютворювальні мінерали.

Основним компонентом є целюлоза, що становить близько 50 % загальної маси. Целюлоза є високомолекулярним важким полімером  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , де  $n$  – ступінь полімеризації, що дорівнює 6000–14000. Целюлоза стійка речовина, нерозчинна у воді та органічних розчинниках (спирт, ефір).

Лігнін є хімічним компонентом деревини, кількість змінюється від сорту деревини. М'які сорти містять близько 20–35 % лігніну, у твердих сортах вміст лігніну становить близько 15–25 %. Лігнін є макромолекулярною складовою, хімічно

нестійкий, легко окислюється, взаємодіє з хлором, розчиняється при нагріванні в лугах, водних розчинах сірчистої кислоти та її кислих солей.

Геміцелюлози це група полісахаридів, до якої входять пентозани  $(C_5H_8O_4)_n$  та гексозани  $(C_6H_{10}O_3)_n$ . Ступінь полімеризації у геміцелюлози становить від 60 до 200.

Крім основних органічних речовин, у деревині міститься невелика кількість екстрактивних речовин (таніди, смоли, пектини, жири та ін.), розчинних у воді, спирті та ефірі.

Гранулометричний склад подрібнених деревних відходів змінюється від 315 мкм до 5000 мкм.

Хімічний склад різних порід деревини наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Хімічний склад деревини

Склад \ Порода	Дуб	Сосна	Береза	Бук
Вуглець, С, %	50,2	50,2	48,9	49,0
Кисень, О, %	43,4	43,3	44,6	44,3
Водень, Н, %	6,0	6,1	6,1	6,1
Азот, N, %	-	0,2	0,1	0,1
Сірка, S, %	0,01	0,01	0,01	0,01
Зола, %	0,4	0,2	0,3	0,5

Вологість деревини становить близько 57 %. Деревина є високореакційним паливом із виходом летючих близько 80 %. Деревина містить золютворюючі компоненти (лужні елементи) у кількості 0,2–0,5 %. Температура розм'якшення золи становить близько 1300 °С. Кора містить близько 6 % золи.

Теплота згоряння різних порід дерева становить від 187 до 197 МДж/кг.

Теплота згоряння деревини залежить від робочої вологості. Так, при вологості деревини 57 % теплота згоряння становить 6,18 МДж/кг, а за вологості 5–8 % теплота згоряння становить 16,2–16,8 МДж/кг.

Теплота згоряння деревних відходів становить:

- тирса  $Q_H^p = 15,5$  МДж/кг;
- кора  $Q_H^p = 8,8$  МДж/кг
- суки  $Q_H^p = 8,4$  МДж/кг;
- пні  $Q_H^p = 9,6$  МДж/кг.

Термічне розкладання деревних відходів відбувається за температури від 160 °С до 300 °С.

Склад газів (летючих) при термічному розкладанні деревини (при 700 °С):

$$CO_2 = 38,5\%; CO = 25,2\%; CH_4 = 24,9\%; C_2H_4 = 8,5\%; H_2 = 2,8\%.$$

Щільність деревини змінюється від 460 кг/м<sup>3</sup> (сосна) до 650 кг/м<sup>3</sup> (дуб). Низька щільність деревини та парусність частинок (діаметром понад 400 мкм) визначають низьку швидкість витання частинок та їх віднесення з топкового обсягу, що визначає

теплові втрати при спалюванні деревини та деревних відходів.

Оцінка можливості спалювання деревних відходів залежно від вологості та зольності визначається заштрихованою зоною трикутника Таннера (рис. 1).

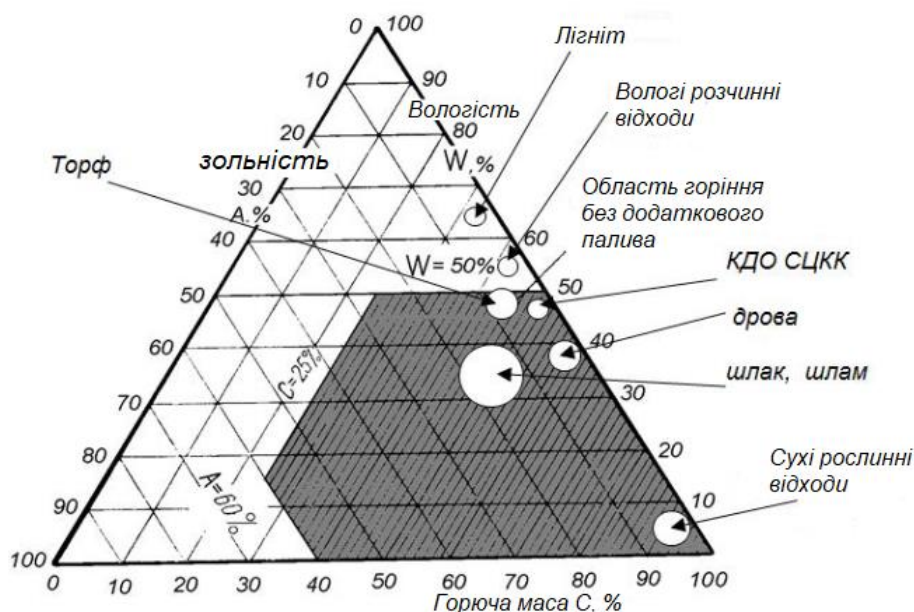


Рис. 1. Трикутник Таннера

Розвиток біоенергетичних технологій спрямовано на встановлення такого обладнання: деревоспалювальні станції систем централізованого тепlopостачання потужністю 1–10 МВт, промислові деревоспалювальні котли потужністю 0,1–5 МВт, мініТЕЦ потужністю 1–10 МВт.

**Визначення мети і завдання дослідження.** Метою цієї роботи є розробка теплової схеми когенераційної енергетичної установки для спалювання деревних відходів.

Для досягнення сформульованої мети необхідно виконати аналіз технологій спалювання різних паливних відходів та розробити схему когенераційної (комбінованої) енергетичної установки, яка відрізняється більшою тепловою ефективністю та незалежністю від відстані до споживачів.

**Основна частина дослідження.**

Огляд технологій спалювання деревних відходів [3–14] показує, що для спалювання деревних відходів застосовуються шарові механічні топки, топки з киплячим шаром і вихрові топки.

Серед механічних топок найефективнішими є топки фірми WELLONS.

Технологія WELLONS спалювання деревного палива з валами-колосниками, що обертаються, показана на рис. 2. Випускаються парові котли продуктивністю від 10 т/год до 110 т/год.

Випускаються котли з топками із киплячим шаром [10]. На рис. 3 показано камерну топку з киплячим шаром. Циркуляція топкових газів та вторинного повітря – у вертикальній площині топкового об'єму.

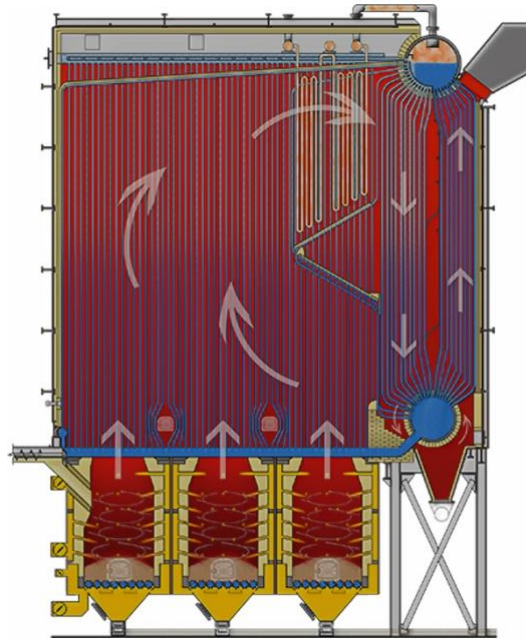


Рис. 2. Топка WELLONS з колосниками, що обертаються

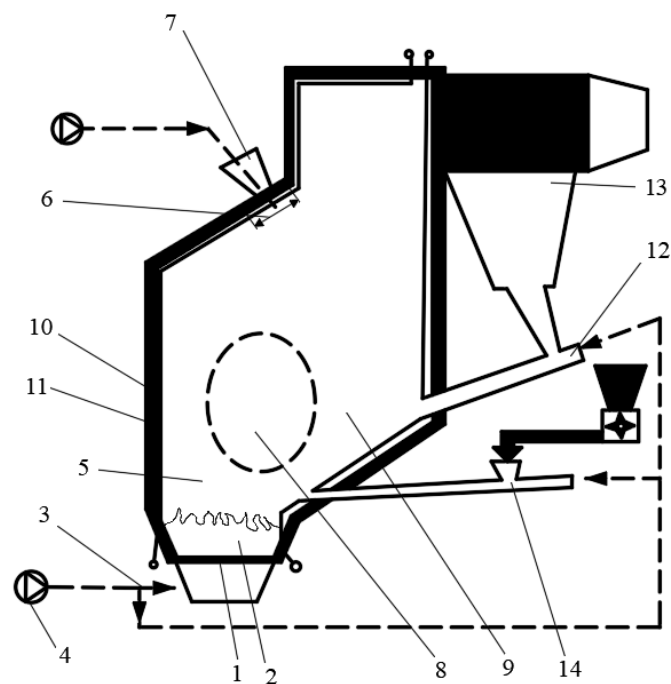


Рис. 3. Схема топки шарового спалювання твердого палива та вертикальною циркуляцією над шаром [10]:

- 1 – повітророзподільні решітки; 2 – киплячий шар; 3 – лінія подачі повітря;
- 4 – вентилятор; 5 – надшаровий об'єм топки; 6 – ділянка подачі повітря; 7 – сопло подачі вторинного повітря; 8 – умовна зона обертання; 9 – застійна зона;
- 10 – обмуровка; 11 – топкові екрани; 12 – ежектор повернення виносу; 13 – бункер;
- 14 – система подачі палива; 15 – лінія подачі вторинного повітря

На рис. 4 показана топка з киплячим шаром і горизонтальним рухом газів і частинок над киплячим шаром, що забезпечує зниження винесення частинок і повніше їх спалювання.

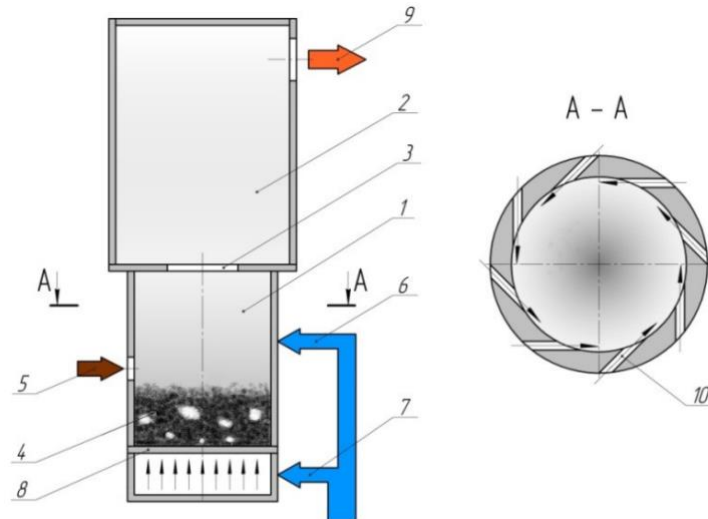


Рис. 4. Схема топки [11]:

1 – камера згоряння (вихрова камера); 2 – камера догоряння; 3 – пережим; 4 – киплячий (нерухомий) шар; 5 – введення палива; 6 – тангенціальне введення вторинного повітря; 7 – введення первинного повітря; 8 – газорозподільні ґрати; 9 – відведення продуктів горіння; 10 – сопла введення вторинного повітря

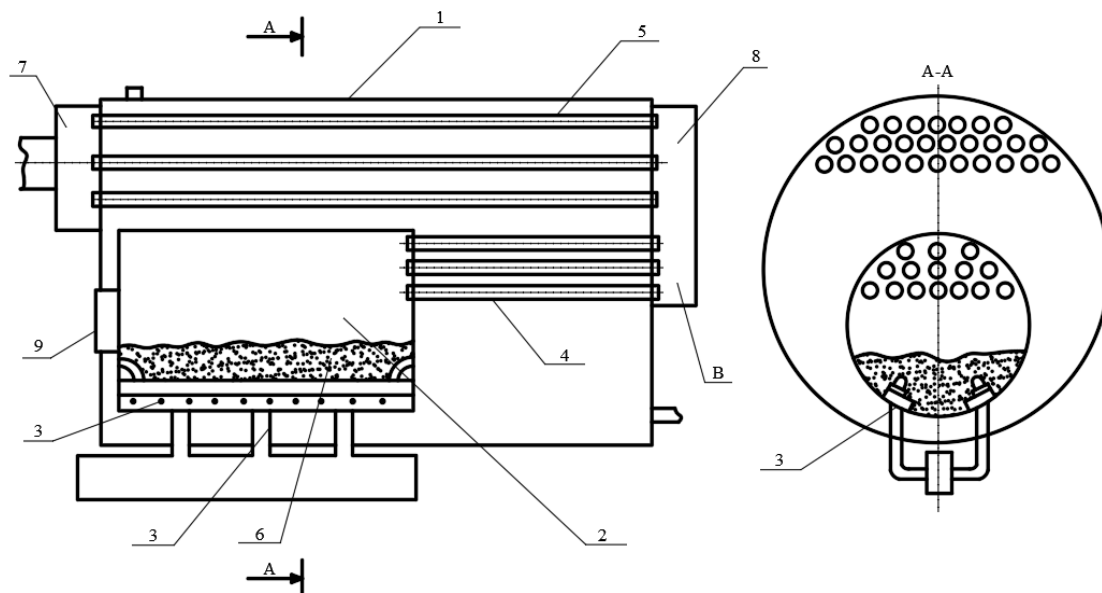


Рис. 5. Схема жаротрубного котла з киплячим шаром [9–13]:

1 – корпус котла; 2 – жарова труба; 3 – влаштування введення дутьового повітря під шар палива; 4 – короткі димарні труби; 5 – довгі димарні труби; 6 – псевдозріджений шар; 7 – передня димова коробка; 8 – задня димова коробка; 9 – дверцята топача; В – місце відбору проб димових газів



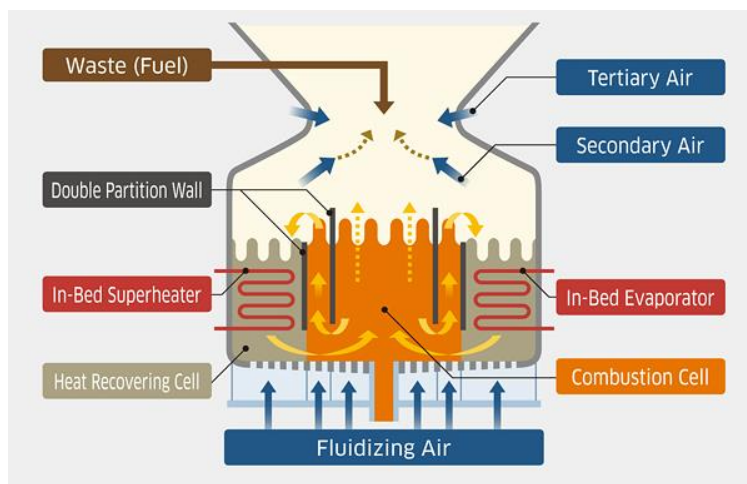


Рис. 6. Принцип внутрішньої циркуляції котла з псевдозрідженим шаром [https://global.kawasaki.com]

Топки характеризуються поділом камери згоряння та тепловідвідних поверхонь. Дисперсний матеріал циркулює між ними, що дає змогу регулювати температуру киплячого шару і запобігати корозії теплообмінних труб. Застосування внутрішньої та зовнішньої циркуляції забезпечує підвищення енергетичної

ефективності котлів та їх екологічні характеристики.

На рис. 7 показана вихрова топка для спалювання бурого вугілля [15–18]. Ця технологія використовується на енергетичних котлах.

На рис. 8 показана кільцева топка, що застосовується на енергетичних котлах для спалювання бурого вугілля [19].

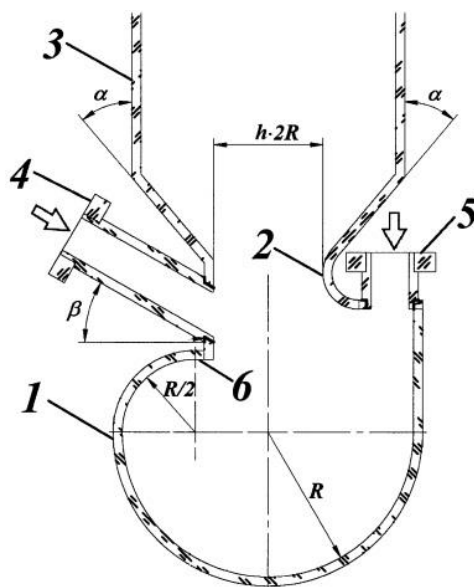


Рис. 7. Вихрова топка:

1 – вихрова камера горіння; 2 – дифузор; 3 – камера охолодження; 4 – основні сопла; 5 – додаткові сопла; 6 – «козилок»;  $\alpha$  – кути розкриття дифузора;  $\beta$  – раціональний кут нахилу осі основних сопел до горизонту;  $h$  – відносна ширина горловини дифузора;  $R$  – радіус вихрової камери горіння

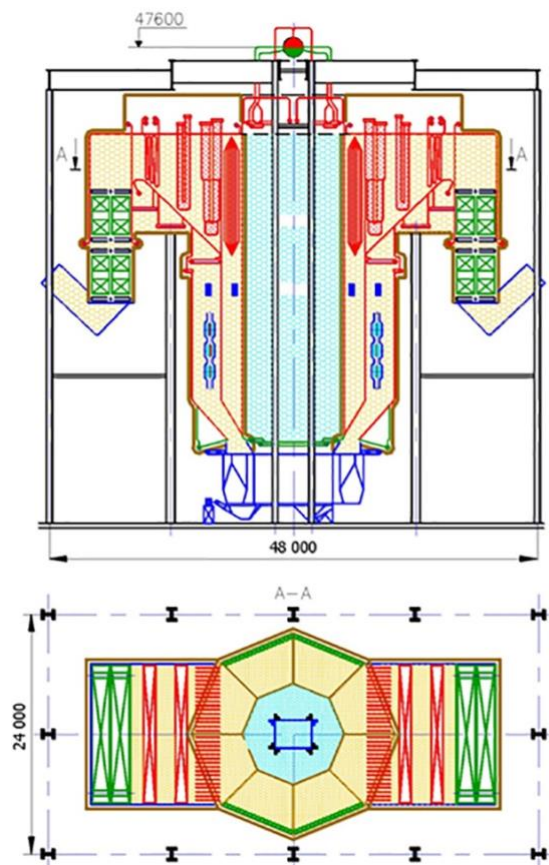


Рис. 8. Кільцева топка

Котельні установки для виробництва теплової енергії з біомаси мають високу енергетичну ефективність ( $EUC_{NR} > 2 - 5$ ).

Порівнюючи технологію прямого спалювання біомаси та інші технології термодинамічної конверсії (газифікації) [25], можна бачити, що пряме спалювання, газифікація в потоці і газифікація в ЦКС мають високі значення показників енергетичної ефективності ( $EUC_{NR} = 5,5 - 8$ ). Проте коефіцієнт енергетичної ефективності залежить від відстані транспортування біопалива. Для забезпечення  $EUC_{NR} > 5$  відстань транспортування обмежується до 100–200 км.

Для умов України тюкову солому, деревну тріску та гранули з біомаси можна перевозити на відстань до 30 км при  $EUC_{NR} > 2$ . Дерев'яні пелети, гранули не мають обмеження за відстанню транспортування.

Найбільш ефективною технологією термічної переробки деревних та рослинних відходів є когенераційна технологія, що забезпечує виробництво електроенергії та теплоти [29]. У роботах [26, 27] наведено результати чисельного дослідження процесу спалювання деревного пилу в камері згоряння газотурбінної установки. У роботах [20–24] наведено теплові схеми твердопаливних котельних енергетичних установок. У цій роботі наведено схему когенераційної установки для спалювання деревного пилу з розміром частинок від 2.5 мкм до 25 мкм.

Результати чисельних розрахунків показали [28], що у вихровій топці (камері згоряння) із зустрічними потоками палива та повітря забезпечується повне згоряння палива. Температура продуктів згоряння на виході камери згоряння становить 1500–1600 °С, що забезпечує рідке видалення

шлаку. Очищені продукти згоряння подаються в теплообмінник і підігрівають стиснене в компресорі повітря, яке

подається в турбіну. Схема когенераційної установки показана на рис. 9.

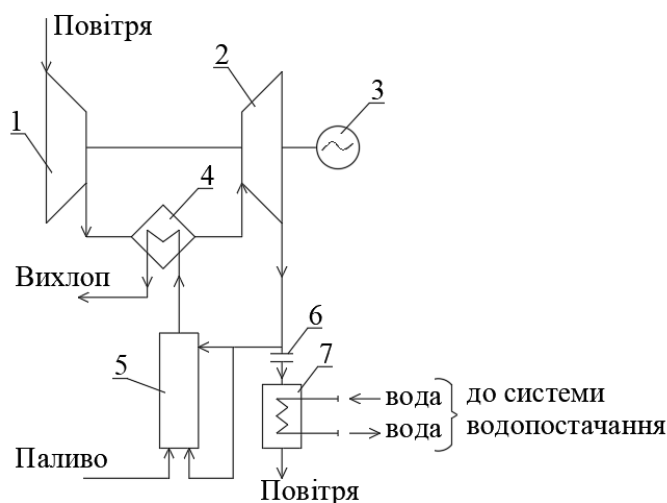


Рис. 9. Схема твердопаливної енергетичної установки:

1 – компресор; 2 – турбіна; 3 – електрогенератор; 4 – теплообмінник;  
5 – камера згоряння; 6 – дросель; 7 – теплоутилізатор

Нагрів стисненого повітря в теплообміннику 4 запобігає потраплянню твердих продуктів згоряння в турбіну 2. У вихровій камері 5 згоряння відбувається згоряння деревного пилу розміром 5–25 мкм з рідким шлаковидаленням. Установка забезпечує вироблення електроенергії та теплоти.

#### Декарбонізація та перехід до ВДЕ.

Високі ціни на газ у 2021 р. викликані подорожчанням рідкісноземельних металів та інших елементів, що використовуються у відновлюваній енергетиці: літій на 400 %, кремній – 300 %, алюміній – 37 %, кобальт – 85 %, неодим – 58 %, магній – 9 %, мідь – 25 %, цинк та нікель – 25 %.

Відновлювана енергетика також потребує ресурсів, з яких виготовляють вітряки та сонячні панелі. Вітряки та сонячні панелі на 70 % складаються з металів та сплавів, і їхня вартість позначиться на вартості генерації нових потужностей ВІЕ.

Аналіз причин зростання цін на комплектувальні частини для ВДЕ показує,

що при зростанні цін на органічне паливо (газ, нафту, вугілля) та зростанні будівництва ВДЕ збільшуються ціни на літій, кобальт та інші елементи. При цьому запаси рідкісноземельних обмежені і зосереджені в кількох країнах (Китай, Австрія, Болівія, Чилі, Бразилія, Конго) і тому ці країни ведуть жорсткішу цінову політику.

Тому майбутній розвиток ВДЕ пов'язаний з економікою енергетики, політикою та кліматом. Очевидно, в найближчому майбутньому вугільна та біопаливна генерації залишатимуться.

**Висновки.** Результати чисельного дослідження та аналізу технологій термічного перетворення твердих біопалив показують, що технології шарового спалювання, спалювання в киплячому шарі, вихрові топки забезпечують ефективне спалювання біопалива. Аналіз термодинамічної ефективності процесів перетворення твердих палив вказує на більш високу ефективність систем когенерації з виробленням електроенергії та теплоти.

Список використаних джерел

1. Енергетичний потенціал біомаси в Україні. Київ: Видав. Центр НУБіП України, 2011. 28 с.
2. Гелетуха Г. Г. Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива: дис. ... д-ра техн. наук. Київ: ІТТФНАНУ, 2021.
3. Баскаков А. П., Мацнев В. В., Распопов І. В. Котлы и топки с кипящим слоем. Москва: Энергоатомиздат, 1995. 349 с.
4. Махорін К. Е., Хінкіс П. А. Спалювання палива в псевдозрідженому шарі. Київ: Наукова думка, 1989. 204 с.
5. Кучин Г. П., Скрипко В. Л., Урда Н. Н. Спалювання низькотемпературних палив у псевдозрідженому шарі. Київ: Техніка, 1987. 144 с.
6. Бородуля В. А., Виноградов Л. М. Спалювання твердого палива в псевдозрідженому шарі. Мінськ: Наука та техніка, 1980. 190 с.
7. Досвід спалювання різних видів біомаси в Росії та Білорусії / Г. А. Рябов, Д. С. Літун, Є. А. Піцуха, Ю. С. Теплицький, В. А. Бородуля. *Електричні станції*. 2015. № 9. С. 9–17.
8. Карапетов А. Шарове спалювання біопалива. Огляд технологій. *Ленпромінформ*. 2016. № 1 (115).
9. Ісьємін Р. Л. Котел, що працює на низькотемпературному твердому паливі. *Житлове та комунальне господарство*. 2005. № 3.
10. Пузирьов Е. М. Дослідження топкових процесів і розробка котлів для низькотемпературного спалювання горючих відходів та місцевих палив: дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2003.
11. Піцуха Е. А. Наукові основи створення високоефективних циклонно-шарових топкових пристроїв для котлів, що працюють на твердому біопаливі: дис. ... д-ра техн. наук. Мінськ, 2019.
12. Особливості процесів спалювання біопалива в котлах із КШ / Г. А. Рябов та ін. *Теплоенергетика*. 2005. № 9. С. 54–60.
13. Водогрійні котли з киплячим шаром і шаром палива, що інтенсивно продувається, для спалювання низькотемпературного вугілля та біомаси / Р. Л. Ісьємін, С. Н. Кузьмін, В. В. Коняних, А. В. Михальов, А. Т. Зорін. *Новини теплопостачання*. 2008. № 5 (93). С. 57–63.
14. Бородуля В. А., Винаградов Л. М. Спалювання твердого палива у псевдозрідженому шарі. Мінськ: Наука та техніка, 1980. 190 с.
15. Саламатов В. В. Наукові основи створення та маловитратної реконструкції вугільних пароагрегатів під вихрову технологію спалювання. *Вісті Томського політехнічного університету*. 2014. № 4 (324). С. 25–38.
16. Голованов Н. В. Малогабаритні парогенератори з вихровою топкою ЦКТИ. Особливості конструкції та експлуатації. Перспективи застосування. *Праці ЦКТИ*. Ленинград: ЦКТИ, 1978. Вип. 154. С. 3–13.
17. Вихрова топка / Голованов Н. В., Накоряков В. Є., Бурдуков А. П. та ін.: пат. РФ № 2042084. 1995, Бюл. № 8.
18. Вихрова топка / Ануфрієв І. С., Красинський Д. В., Саламатов В. В. та ін.: пат. РФ № 2585347. 2016, Бюл. № 5.
19. Кільцеві топки пиловугільних котлів / Ф. А. Серант, Б. П. Устименко, В. Н. Змейков, В. О. Кроль. Алма-Ата: Наука, 1988. 168 с.
20. Твердопаливна газотурбінова установка / Алфімов В. В., Князєв А. Н., Ломазов В. С., Назаренко Ю. Б.: пат. РФ № 2545113. 2015, Бюл. № 9.

21. Газотурбінне встановлення / Білошапка С. В., Мітін В. П., Лоцман Г. П., Шмаков Д. С., Субота А. В., Мироненко Р. А.: пат. РФ № 56969. 2006, Бюл. № 3.
22. Клименко В. Н., Мазур А. Н., Сабашук П. П. Когенераційні системи із тепловими двигунами: довідковий посібник: у 3 ч. Київ: Інститут прикладних досліджень в енергетиці, 2008. 560 с.
23. Спосіб та пристрій для подачі порошкоподібного палива до камери згоряння газотурбінного двигуна відкритого типу / Цун-Сянь Г. О.: пат. РФ № 2477378. 2013, Бюл. № 7.
24. Спосіб спалювання вугілля та пристроїв для його реалізації / Алексеєнко С. В., Бурдуков О. П., Попов Ю. С.: пат. РФ № 2327889. 2008, Бюл. № 18.
25. Pucker J., et al. Biomass and bioenergy. 2012. № 38. P. 95–101.
26. Пчёлкин Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Москва: Машиностроение, 1984. 280 с.
27. Сорунзан А. Дослідження процесів горіння пилоподібного біопалива в скрутних умовах камер згоряння. Москва: МЕІ. *III науково-технічна конференція студентів*. 2020.
28. Redko A., Burda Yu., Dzhyoiev R., Redko I., Norchak V., Pavlovskiiy S., Redko O. Numerical Modeling of Peat Burning Processes in a Vortex Furnace with Countercurrent Swirl Flows, *Thermal science*, 2020. DOI REFERENCE: <https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R>.
29. Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерації) та використання скидного енергопотенціалу: Закон України, 2005. № 4527.

---

Джиоєв Рафаель Леванович, аспірант кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського національного університету будівництва та архітектури.  
ORCID iD: 0000-0003-4046-7038. E-mail: office@khgorgas.com.ua.

Dzhyoiev Rafael Levanovich, postgraduate student, department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture.  
ORCID iD: 0000-0003-4046-7038. E-mail: office@khgorgas.com.ua.

Статтю прийнято 29.11.2021 р.

---

---

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

---

---

УДК 625.143(477)

**ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ КОНТАКТУ ТА РОЗМІРУ ПОВЕРХНІ КОЧЕННЯ ОБОДА КОЛЕСА НА ГОЛОВІЦІ РЕЙКИ ВНУТРІШНЬОЇ НИТКИ КРИВОЇ ДІЛЯНКИ В ПРОЦЕСІ РОЗПИРАННЯ КОЛІЇ**

Кандидати техн. наук В. В. Новіков, А. О. Бабенко, викладач В. О. Корнієнко

**DETERMINATION OF THE PLACE OF CONTACT AND THE SIZE OF THE ROLLING SURFACE OF THE WHEEL RIM ALONG THE RAIL HEAD OF THE INNER THREAD OF THE CURVED SECTION IN THE PROCESS OF LATERAL PRESSURE OF THE TRACK**

PhD (Tech.) V. V. Novikov, PhD (Tech.) A. O. Babenko, Teacher V. Korniienko

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256613>

---

***Анотація.** Згідно з розрахунковою схемою, що враховує усі виникаючі в процесі кочення обода колеса першої напрямної осі візка вантажного вагона розрахункові нахили поверхні обода відносно поверхні рейки, та аналізом поперечного профілю поверхні кочення рейки типу Р65, визначено місце контактування цих поверхонь у зоні закруглення коробової кривої радіусом 80 мм. Це дало змогу визначити розміри плями контакту поверхні кочення обода колеса по поверхні головки рейки згідно з теорією Герца–Беляєва при відомих значеннях радіусів поверхонь кочення та врахувати їх при визначенні максимальної небезпечної норми ширини рейкової колії. На підставі розрахунку місця розташування математичної точки контакту на коробовій кривій визначено розмір контактної площадки спирання обода колеса вантажного вагона на поверхню головки рейки.*

***Ключові слова:** контактна площадка спирання, коробова крива, розпирання колії, максимальна небезпечна ширина рейкової колії.*

***Abstract.** In widespread sources the results of calculations of the sizes of contact planes of an ellipse form at interaction of locomotive wheels with rails of type P65 which small axes make 5-10 mm depending on loading taking into account dynamic influence are resulted. These data do not correspond to the purpose and objectives of this study, which is to determine the size of the half-axis of the contact plane under vertical load on the head of the rail thread in the range from 100 kN to 180 kN, when the wheel of the freight car rests on a bevel a wheel having a conicity of 1:10, with a wheel radius  $r_1 = 475$  mm and a rolling surface radius of the rail head  $r_2 = 80$  mm. The size of the contact plane of support of the rim of the wheel of a freight car on the surface of the head of the rail type P65 is determined in the work. The calculations were performed on the basis of preliminary determination of the location of the mathematical point of contact on the box curve, which outlines the surface of the rail head in cross section under deterministic conditions of pressing intermediate rail fasteners of separate type under the action of outstanding accelerations for freight  $-0.3$  m / s<sup>2</sup>. The purpose of the calculations is to obtain the practical value of the maximum dangerous width of the rail track, which corresponds to the conditions of track expansion at vertical wheel load on the rail 140 kN and at maximum spacing forces that provide the highest values of lateral displacements rail thread with a surface adjacent to the chamfer of the wheel rim. Based on calculations by the*

*Hertz-Bilyaev method, it was obtained that the average value of the contact strip of the rail and the rim of the wheel of a freight car, at a vertical load  $P = 140 \text{ kN}$ , is:  $b = 3.2 \text{ mm}$ , so  $b / 2 = 1.6 \text{ mm}$ . But if you round to the accuracy of measuring the width of the rail track -  $b / 2 = 1.6 \text{ mm}$ .*

**Keywords:** width of the rail track, half-axis, wheel rim, track expansion.

**Вступ.** Колійне господарство УЗ нині перебуває в умовах вкрай обмеженого та недостатнього фінансування, яке традиційно здійснюється за залишковим принципом і не забезпечує відновлення основної складової основних фондів-рейок, у надскладних умовах експлуатації залізничної колії, розташованої в кривих ділянках малого радіуса поєднано зі складним поздовжнім профілем на кшталт Львівської залізниці. Надінтенсивний бічний знос головок рейкових плітей завдає великих фінансових втрат через обмеження ресурсу напрацювання бічного зносу недостатньо обґрунтованою нормативною величиною максимальної небезпечної ширини рейкової колії – 1545 мм, тому ретельне врахування усіх експлуатаційних та конструктивних факторів впливу для максимального обґрунтованого визначення максимальної допустимої небезпечної ширини рейкової колії на залізобетонних шпалах з роздільними проміжними рейковими скріпленнями – це актуальне наукове завдання. Для визначення розміру контактної площадки спірання обода колеса вантажного вагона на поверхню головки рейки типу Р65 попередньо встановлено місце розташування математичної точки контакту на коробовій кривій, якою окреслена поверхня головки рейки у поперечному перерізі, з урахуванням детермінованих умов притиснення прикріплювачів проміжних роздільних рейкових скріплень у колії із залізобетонними шпалами при дії максимальних непогашених прискорень для вантажного руху –  $0,3 \text{ м/с}^2$ .

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасній науковій літературі, яка присвячена дослідженням міцності та тривалої працездатності рейок магістральних залізниць, як правило,

наведені результати визначення розмірів контактної площадки при взаємодії локомотивних або найбільш навантажених коліс вантажних вагонів [6, 7, 15, 16], проте відсутні результати досліджень та розрахунків для вагонних коліс, які розглядаються в процесі розпирання рейкової колії, коли стану найбільшої небезпеки провалювання колеса у колію відповідають не найбільші колісні навантаження, а такі, які забезпечують найбільші бічні відтиснення головки зовнішньої рейкової нитки, та максимальні розпірні зусилля від кочення колеса по внутрішній рейковій нитці конічною поверхнею, яка межує з фаскою.

**Визначення мети та завдання досліджень.** Визначення математичного місця контакту поверхні обода колеса вантажного вагона, що спирається конічною поверхнею, яка межує з фаскою на поверхні головки рейки типу Р65, поверхня якої окреслена коробовою кривою послідовно радіусами 500 мм, 80 мм, 15 мм, і на підставі цих розрахунків визначення розміру поверхні кочення обода колеса при спіранні на головку рейки внутрішньої нитки кривої ділянки колії, враховуючи процес розпирання.

**Основна частина.** Розпирання колії – це такий процес, коли перша вісь візка відтискає зовнішню рейкову нитку в кривій ділянці колії напрямним колесом, а інше колесо цієї осі котиться тією частиною обода, яка має конічність  $m_2$ , що відповідає тій ділянці поперечного перерізу, яка межує з фаскою колеса. Саме це спричиняє появу сил розпирання обох рейкових ниток. Розрахунки максимальної ширини колії довели, що мінімальні з отриманих за кресленням ГОСТ 9036 (ВНД32.07.001-2001. рис. 6.18) [1] та ЦВ-ЦЛ-0062 (рис. 5, в) [2] є такі, які мають вказану конусність обода  $m_2 = 10$ .

Саме для цих випадків визначається місце, тобто ділянка коробової кривої, якою окреслено поверхню кочення, головки рейки типу Р65 відповідно до ДСТУ 4344:2004 [3] радіусами 500 мм, 80 мм, 15 мм. Цей розрахунок дозволить визначити розміри плями контакту згідно з теорією Герца–

Беляєва [4] при відомих радіусах поверхонь кочення колеса та рейки.

Поверхня кочення обода колеса має конічність  $m_2 = 10$ , що має дотичну у поперечному перерізі до точки контакту з поверхнею кочення рейки, яка складає кут з дотичною, проведеною до вертикальної осі рейки  $\beta_m$  (рис. 1).

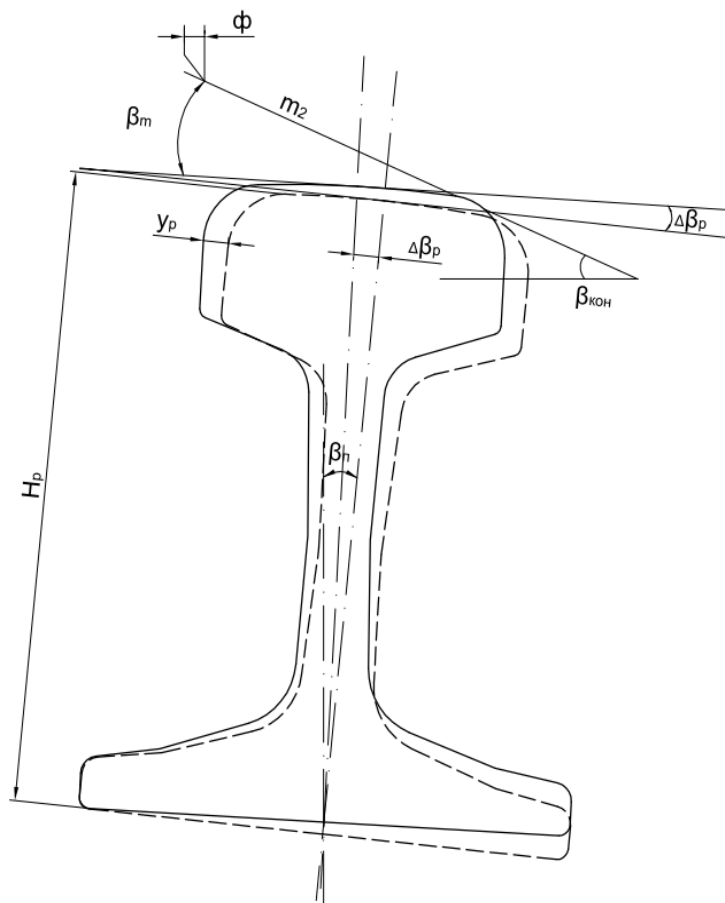


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення кута  $\beta_m$

Бічне розпирання рейки за умови найбільш несприятливої взаємодії, коли кромка підшви рейки має упор у реборду підкладки, приводить до відтиснення лише головки рейки на величину  $u_p$ , яку можна підрахувати для найбільш ослабленого стану притиснень клемних болтів  $M_{кл} = 39$  Нм та закладних болтів  $M_{зб} = 67$  Нм за емпіричною формулою, отриманою у [5]:

$$u_p = (8,4 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-4} \cdot P_v) \cdot Y_b, \quad (1)$$

де  $P_v$  – величина вертикального колісного навантаження на рейку, кН;

$Y_b$  – величина бічного навантаження на рейку від сили розпирання колії, яка визначається за формулою:

$$Y_b = P_v / m_2, \quad (2)$$

де  $m_2$  – конусність обода колеса,  $m_2 = 10$ .

Для найбільш несприятливого навантаження, коли колесо створює лише



статичне зусилля, для вантажного вагона прийнято  $P_{\sigma} = 105$  кН.

Отримаємо:  $Y_{\sigma} = 105/10 = 10,5$  кН.

Визначення величини кута  $\beta_m$  здійснюється без урахування люфтів по підшві рейки, через те що максимальна сила розпирання значно менша за сили тертя по підшві рейки, тобто:

$$Y_{\sigma} < P_{\sigma} f_m, \quad (3)$$

де  $f_m = 0,6$  – коефіцієнт тертя підшви рейки по гумовій прокладці та підкладки по гумовій прокладці [6];

$$P_{\sigma} f_m = 105 \cdot 0,6 = 63 \text{ кН.}$$

Через наявність підуклонки рейки 1/20 та відтиснення головки рейкової нитки на величину  $u_p \approx 1,0$  мм отримаємо фактичний кут нахилу дотичної до поверхні кочення колеса в зоні конусності  $m_2 = 10$ :

$$\beta_m = \beta_{\text{кон}} - \beta_n + \Delta\beta_p, \quad (4)$$

де  $\beta_{\text{кон}} = \arctg 1/10$  – кут нахилу поверхні кочення з  $m_2 = 10$ ;

$\beta_n = \arctg 1/20$  – кут нахилу осі рейки за рахунок її підуклонки 1/20;

$\Delta\beta_p = \arctg Y_{\sigma}/H_{\text{рейки}}$  – зміна кута нахилу осі рейки за рахунок пружного відтиснення силою розпирання  $Y_{\text{розп}}$ ;

$H_{\text{рейки}} = 180$  мм – висота рейки Р65.

Отримаємо:  $\beta_m = 3,116$ .

Величина кута  $\beta$  визначається за формулою згідно з розрахунковою схемою на рис. 2:

$$\beta = \arccos \frac{(80 \cos \alpha - (1,7 - 0,1))}{80}, \quad (5)$$

де  $\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = 0,99979998$   
( $\sin \alpha = 10/500 = 0,02$ ).

Після розрахунків визначена величина кута  $\beta = 11,478^\circ$ .

Остаточно маємо:

$$\beta_m = 3,116^\circ < \beta = 11,478^\circ.$$

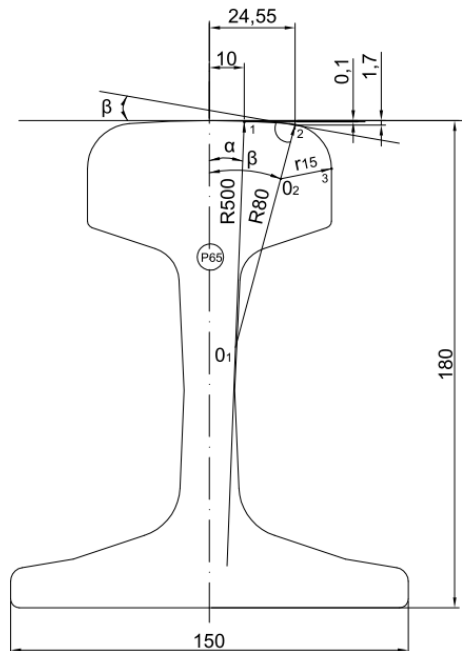


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення кута  $\beta$

Теоретично місце контакту поверхні кочення обода колеса може розташовува-

тися на ділянках коробової кривої, якою окреслена поверхня кочення головки рейки

в межах між точками 1 і 2 або між точками 2 і 3 (рис. 2), або в межах радіуса  $R = 80$  мм або  $r = 15$  мм. Якщо кут  $\beta_m$  буде в межах  $\beta_m < \beta$ , де  $\beta$  – кут нахилу дотичної до коробової кривої в точці 2, яка відповідає місцю зміни радіуса поверхні кочення головки рейки з 80 мм на 15 мм, то місце контакту буде розташовано в межах поверхні кочення, окресленої радіусом 80 мм, а якщо  $\beta_m > \beta$ , то контактування відбуватиметься в межах, окреслених радіусом заокруглення головки рейки  $r = 15$  мм.

Для визначення розміру контактної площадки спирання обода колеса вантажного вагона на поверхню головки

рейки типу Р65 попередньо встановлено місце розташування математичної точки контакту на коробовій кривій, якою окреслена поверхня головки рейки у поперечному перерізі, з урахуванням детермінованих умов притиснення прикріплювачів проміжних роздільних рейкових скріплень у колії із залізобетонними шпалами при дії максимальних непогашених прискорень для вантажного руху –  $0,3 \text{ м/с}^2$ . Кочення колеса по рейці на сучасному рівні розвитку науки [4–11] розглядається як кочення однієї циліндричної поверхні радіуса  $r_1$  по іншій циліндричній поверхні з радіусом  $r_2$  (рис. 3).

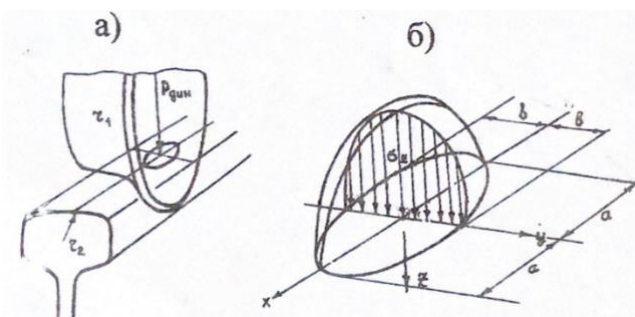


Рис. 3. Графічне зображення контакту вантажного колеса та рейки, що розповсюджується на деяку площадку (а), що має форму еліпса з осями  $2a$  і  $2b$  (б) [4–16]

Розміри півосей  $a$  і  $b$  контактної площадки залежать від співвідношення радіусів контакту тіл  $r_2/r_1$

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3P(1-\gamma)^2}{2E(A+B)}}, \quad b = \frac{n}{m} a, \quad (6)$$

де  $A = \frac{1}{2r_2}$ ,  $B = \frac{1}{2r_1}$ ;

$E$  – модуль пружності рейкової сталі, Мпа;

$\gamma$  – коефіцієнт Пуассона,  $\gamma = 0,25 \div 0,30$ ;

$m$  і  $n$  – коефіцієнти, що приймаються залежно від кута  $\Theta$ , який визначається зі співвідношення

$$\text{Cos } \Theta = \frac{|B-A|}{|A+B|}. \quad (7)$$

Значення коефіцієнтів  $m$  і  $n$  для різноманітних кутів  $\Theta$  можемо прийняти з довідкової літератури [2, 3].

Для обода колеса вантажного вагона в зоні конічності 1:10 величина радіуса колеса становить  $r_1 = 47,5$  см, а радіус поверхні кочення головки рейки становить  $r_2 = 8$  см. Усі розрахункові величини зведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Розрахункові величини  $A, B, m, n$

$A$	$B$	$\text{Cos } \Theta$	$\Theta^\circ$	$m$	$n$
0,0625	0,010526	0,7117	44,62	1,94	0,6

Таблиця 2

Розрахункові значення осей контактної площадки у формі еліпса  $a$  і  $b$ , мм

	Вертикальне навантаження $P$ , кН				
	100	120	140	160	180
$a$ , мм	9,3	9,87	10,4	10,87	11,30
$b$ , мм	2,9	3,05	3,2	3,36	3,5

**Висновки.** Таким чином визначено, що контактування поверхні обода колеса ватажного вагона з конічністю  $m_2 = 10$  відбувається в місцях поверхні кочення головки рейки, окресленої радіусом 80 мм. Це стало підставою для визначення ширини смуги контакту колеса і рейки, яка відповідає еліпсній плямі контакту, з визначенням розмірів великої та малої півосі еліпса. Визначені розрахунками

розміри контактної площадки становлять від 18,6 мм  $\times$  5,8 мм до 22,6 мм  $\times$  7 мм, а площа контакту – від 3,4 см<sup>2</sup> до 4,97 см<sup>2</sup> у зоні контактування на головці рейки  $r_2 = 80$  мм. Середня величина смуги контакту рейки (меншої осі контактної еліпсоподібної плями) становить для  $P=140$  кН,  $b = 3,2$  мм, отже, півосі –  $b/2=1,6$  мм, та, якщо округлити до цілої величини, –  $b/2=2,0$  мм.

#### Список використаних джерел

1. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм: ВНД 32.07.001-2001 (Нова редакція). Київ: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2011. 170 с.
2. Інструкція з огляду, обстеження, ремонту та формування вагонних колісних пар: ЦВ-ЦЛ-006. Київ, 2005. 103 с.
3. Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови ДСТУ 4344:2004. Держспоживстандарт України. Київ, 2005. С. 68.
4. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. Москва: Наука, 1965. 856 с.
5. Новіков В. В. Підвищення строку експлуатації рейок в кривих ділянках колії зі скріпленнями роздільного типу: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06. Харків, 2021. 161 с.
6. Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом: підруч. для ВНЗ: у 2 т. Київ: Інпрес, 2010. Т. 1. 528 с.; Т. 2. 456 с.
7. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: Транспорт, 1987. 479 с.
8. Kosarchuk V. V., Danilenko É. I., Agarkov A. V. Effect of Railcar Wheel Tire Profiles on the Contact Stress Level in Subway Rails. *Strength of Materials*, 2020. Vol. 52. Issue 3. P. 398–406.
9. Bogacz R., Konowrocki R. On new effects of wheel-rail interaction. *Archive of Applied Mechanics*, 2012. Vol. 82. Issue 10, 11. P. 1313–1323.
10. Мелентьев Л. П., Альбрехт В. Г., Шавырин М. М. Пути повышения эффективности использования ресурсов рельсов. Контроль рельсов. *Труды ВНИИЖТ*. Москва: Транспорт, 1986. С. 3–17.
11. Вериго М. Ф. Ещё раз о причинах и механизмах контактно-усталостных отказов рельсов. *Вестник ВНИИЖТ*. 2001. № 5. С. 12–15.
12. Wang K., Huang C., Zhai W., Liu P., Wang S. Progress on wheel-rail dynamic performance of railway curve negotiation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 1 June 2014. Vol. 1, Issue 3, P. 209–220.
13. Dailydka S., Lingaitis L., Myamlin S., Prichodko V. Modelling the interaction between railway wheel and rail. *Transport*, July/September 2008. Vol. 23. Issue 3. P. 236–239.

14. Коган А. Я., Гаврилов В. М. Математическая модель расчёта контактно-усталостной долговечности рельсов. *Вестник ВНИИЖТ*. 1983. № 2. С. 46–48.
15. Сосновский Л. А., Сенько В. И. Износоусталостные повреждения и реальное состояние силовой системы типа колесо – рельс. *Наука и транспорт: вестник БелГУТа*. 2001. № 2 (3). С. 100–104.
16. Лысюк В. С., Сазонов В. Н., Башкатова Л. В. Прочный и надежный железнодорожный путь / под ред. В. С. Лысюка. Москва: ИКЦ «Академкнига», 2003. 589 с.
- 

Новіков Вадим Володимирович, кандидат технічних наук, 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.

Корнієнко Вікторія Олександрівна, викладач (вищої категорії) Харківського державного автомобільно-дорожнього коледжу, Циклова комісія «Будівництво мостів та інших штучних споруд». Тел.: (066) 404 70 38.

E-mail: viktoriakornienko55545@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6643-087X.

Novikov Vadym, PhD (Tech.), 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.), Associate Professor, 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.

Korniienko Viktoriia, Teacher (the highest category), Kharkiv State Automobile and Highway College, Cycle commission «Construction of bridges and other artificial structures». Tel: (066) 404 70 38.

E-mail: viktoriakornienko55545@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6643-087X.

Статтю прийнято 30.09.2021 р.

УДК625.032.4

## ДІАГНОСТИКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ КОЛІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ ТИПІВ СКРІПЛЕННЯ

Кандидати техн. наук В. Д. Бойко, Д. О. Потапов, В. О. Демченко, В. М. Молчанов, асп. О. В. Демченко

## EXPERIMENTAL STUDIES OF TRACK STRENGTH USING DIFFERENT TYPES OF FASTENING

Ph.D. tech. V. Boyko, Ph.D. tech. D. Potapov, Ph.D. tech. V. Demchenko, Ph.D. tech. V. Molchanov, postgraduate O. Demchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256615>

---

*Анотація.* Проведені теоретичні та експериментальні дослідження горизонтальних поперечних і поздовжніх сил та проведений аналіз поздовжньої та поперечної стійкості колії можуть бути використані при розрахунках залізничної колії на міцність і стійкість та встановленні сфер застосування залізничної колії зі скріпленнями КПП-5, прогнозуванні ресурсу експлуатації конструкції та розробленні нормативів проведення ремонтно-колійних робіт. Основним завданням експериментальних досліджень було встановлення фактичного

стану елементів проміжних скріплень і залізобетонних шпал, знаходження максимальної сили опору рейки поздовжньому переміщенню, які забезпечуються скріпленнями при різних умовах експлуатації. Виконано експериментальні дослідження пружних характеристик горизонтальних поздовжніх характеристик жорсткості рейкових ниток, дослідження виконувались у різні пори року. Виконані експериментальні дослідження поперечних деформацій рейкових ниток по головці і підшвиві рейок дали можливість визначити точні характеристики горизонтальної бокової жорсткості рейкових ниток для рейок типу Р65 при скріпленнях різних типів.

**Ключові слова:** залізнична колія, проміжні рейкові скріплення, угон колії, погонний опір поздовжньому зсуву, сили угону, температурні сили, гальмівні сили, модуль пружності, жорсткість рейкових ниток, поздовжня і поперечна стійкість.

**Abstract.** Experimental and theoretical researches of influence of a condition of a profile of a surface of rolling of a wheel pair on level of horizontal cross forces of interaction between elements of a rail track and a rolling stock in operation on the railways of Ukraine are carried out. We have further developed approaches to modeling the effect of different types of fasteners on track stability, as the rigidity of the rail thread is directly related to the design of subrail supports and rail fasteners. The main task of experimental research was to establish the actual state of the elements of intermediate fasteners and reinforced concrete sleepers, finding the maximum resistance of the rail to longitudinal movement, which are provided by fasteners under different operating conditions. Experimental studies of the elastic characteristics of the horizontal longitudinal characteristics of the rigidity of rail threads were performed, the studies were performed at different times of the year. Experimental studies of transverse deformations of rail threads on the head and sole of the rails made it possible to determine the exact characteristics of the horizontal lateral stiffness of rail threads for rails type P65 with different types of fasteners. The main experimental studies were conducted on a seamless track within the main sections of the railway. The elements of the intermediate rail fastening during operation are subjected to constant dynamic impact in the process of which there are residual deformations.

Based on the obtained data, calculations were performed to determine the horizontal lateral modulus of elasticity of the railway track, to determine the longitudinal and transverse stability of rail threads depending on the type of fastening. The obtained experimental and theoretical results allow to evaluate the force interaction of the rail track with the rolling stock.

**Keywords:** rail track, stability, wheel pair, horizontal forces, riding surface, speed, self-oscillation, trolley, critical speed.

**Вступ.** Теоретичні дослідження руху коліс тягового рухомого складу по рейковій колії з вирішенням проблем зменшення бокового зносу гребенів колісних пар та головки рейки є однією із проблем взаємодії колії та коліс рухомого складу. Особливо високий рівень інтенсивного зношування рейкової колії та поверхні катання колісних пар є на залізницях із великою кількістю кривих ділянок колії малого радіуса. Бокові переміщення рейкових ниток залізничної колії прямо пов'язані з боковою жорсткістю і поперечним боковим модулем пружності

кожної конкретної рейкової нитки. Бокова жорсткість рейкової нитки безпосередньо пов'язана з конструкцією підрейкових опор і рейкових скріплень. Процес дослідження ускладнюється через низку причин, пов'язаних з великою кількістю невідомих, складною залежністю моментів, сил.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Безпечна та стабільна робота рейкових ниток визначається достатньою їх стійкістю проти поперечних і поздовжніх переміщень [1]. Бокові переміщення рейкових ниток залізничної колії прямо

пов'язані з боковою жорсткістю і поперечним боковим модулем пружності кожної конкретної рейкової нитки. Бокова жорсткість рейкової нитки безпосередньо пов'язана з конструкцією підрейкових опор і рейкових скріплень. Чим більша жорстка підрейкова основа, скріплення – тим менші бокові переміщення рейкових ниток від дії коліс рухомого складу на рейки. Безпосередньо бокові переміщення рейкових ниток можна визначати при випробуваннях конструкції залізничної колії або розрахунковим методом, використовуючи довідкові дані розрахункових характеристик бокової жорсткості рейкових ниток, що надані в довідковій технічній літературі. Але існуючі довідкові дані в технічній літературі [2–4] не відповідають сучасним конструкціям залізничної колії. Крім того, існуючі методи розрахунків або зовсім не передбачають безпосереднє урахування дії на рейки динамічних бокових сил [5], або не дають можливості правильно визначати фактичні значення поперечної бокової жорсткості рейкової нитки і фактичного поперечного модуля пружності рейкової колії в умовах спільної дії на рейки вертикальних і горизонтальних динамічних сил.

Таким чином, урахування вищенаведених вихідних факторів і є **метою даного дослідження**, для досягнення якої потрібно вирішити **такі основні завдання**:

- провести експериментальні випробування горизонтальної бічної жорсткості рейкових ниток із скріпленнями КПП-5, КПП-1, КБ;
- теоретично дослідити зміни горизонтального бічного модуля пружності залізничної колії;
- теоретично визначити поздовжню і поперечну стійкість рейкових ниток;
- експериментально дослідити зміни горизонтальної поздовжньої жорсткості рейкових ниток.

**Основна частина.** При проведенні експериментальних досліджень пружних характеристик прокладок були визначені

статичні та динамічні жорсткості гумових і гумокордових прокладок при стисненні та бічному зсуві.

Випробування проводилися в лабораторних умовах при статичному та динамічному навантаженні. Прокладки випробовувалися на спеціальному пристрої, який дає змогу проводити дослідження як на дію тільки сил стиску, так і на спільну дію стискальних сил і сил зсуву.

При статичних випробуваннях на стискання навантаження прикладалося безперервно в діапазоні від 0 до 25 кН із постійною швидкістю 0,2 кН/с з наступним повним розвантаженням.

Інтервали динамічного навантаження при випробуваннях прокладок становили 20–40 кН, що відповідає навантаженням на рейкову опору під час руху поїздів. Навантаження фіксувалися на манометрах преса. Випробування проводилися при частотах пульсуючого навантаження від 66 до 660 циклів за хвилину (1,1–11 Гц), що відповідає швидкостям проходження осей чотирирівнісного екіпажа від 7 до 70 км/год з відстанню між осями 1,8 м.

Деформації прокладок вимірялися електричними датчиками переміщень із точністю  $\pm 0,03$  мм. Прокладки випробовувалися при температурах 18–22 °С. Отримані значення статистично оброблені за загальноприйнятою методикою з визначенням мінімальних, максимальних, середніх значень і середньоквадратичних відхилень.

Стендові випробування скріплень різних конструкцій на лабораторному обладнанні дали змогу отримати попередні результати значень вертикальної і горизонтальної поперечної жорсткості скріплень в умовах лабораторних навантажень. Фактичні результати жорсткості рейкових ниток у залізничній колії необхідно отримувати в результаті випробувань рейкових ниток з дослідними скріпленнями в експлуатаційних умовах в колії при колісних динамічних навантаженнях від рухомого складу, що експлуатується.

Для отримання достовірних результатів вимірювання проводились у різні періоди року (весна, літо, осінь) на ділянках колії, які експлуатуються на території Південно-Західної залізниці.

Горизонтальне поперечне навантаження на рейку створювалось домкратом шляхом нагнітання тиску в

робочому циліндрі, що фіксувалось манометром, вбудованим у тіло домкрата. Вимірювання проводились без створення вертикального навантаження.

Загальний вигляд розстановки приладів при проведенні досліджень з вимірювання поперечної горизонтальної жорсткості рейкових ниток подано на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд розстановки приладів

Необхідно зазначити, що залежність горизонтальних переміщень головки і підшви рейки від горизонтального навантаження виходить істотно нелінійною, тому що спочатку відбувається вибірка люфтів у деталях кріплення рейки до шпали і тільки на другому етапі відбувається саме бокове переміщення рейкової нитки від дії горизонтальної сили.

Діапазон бокових сил  $H = 40, 60, 80$  кН при визначенні бокової жорсткості рейкових ниток розглядався як найбільш реальний діапазон цих сил, що реалізуються при динамічній взаємодії рухомого складу і колії.

Бокові переміщення рейкових ниток прямо пов'язані з боковою жорсткістю і поперечним боковим модулем пружності. Бокова жорсткість безпосередньо пов'язана з конструкцією підрейкових опор і рейкових скріплень. Чим більш жорстка підрейкова основа і чим більш жорсткі рейкові скріплення – тим менші бокові переміщення рейкових ниток реалізуються при дії коліс рухомого складу на рейки.

Виконані експериментальні дослідження поперечних деформацій рейкових ниток по головці і підшві рейок дали можливість визначити точні характеристики горизонтальної бокової жорсткості рейкових ниток для рейок типу Р65 при скріпленнях різних типів.

Характеристики поперечної (бокової) жорсткості рейкових ниток, що отримані при експериментальних дослідженнях, стали необхідним вихідним експериментальним матеріалом для розрахунків з визначення бокової жорсткості і бокового модуля пружності рейкових ниток при спільній дії на рейку вертикальних і горизонтальних сил від рухомого складу.

Основні експериментальні дослідження проводились на безстиківій колії в межах магістральних ділянок залізниці, проведено структурний аналіз територіальних транспортних систем на основі методів класифікації. В процесі експлуатації елементи проміжного рейкового скріплення піддаються постійному динамічному впливу, в процесі чого виникають залишкові деформації [6].

Основним завданням є встановлення фактичного стану елементів проміжних скріплень і залізобетонних шпал, знаходження максимальної сили опору рейки поздовжньому переміщенню, які забезпечуються скріпленнями при різних умовах експлуатації.

Виходячи з поставлених завдань, у даній роботі отримано експериментально-теоретичне рішення задачі з визначення характеристик горизонтальної бокової пружності рейкових ниток при спільній дії вертикальних і горизонтальних колісних навантажень. Отримано фактичні значення поперечного модуля пружності рейкової нитки  $U_y^{(T)}$  для різних конструкцій рейкової колії із застосуванням рейок і рейкових скріплень сучасних конструкцій. Дані результати дозволяють виконувати розрахунки на міцність і бокову поперечну стійкість рейкових ниток з урахуванням сумісної дії на колію вертикальних і горизонтальних сил для сучасних конструкцій скріплень на залізобетонних і дерев'яних шпалах зі значно вищою точністю, ніж це дозволяє чинна нині методика практичних інженерних розрахунків колії на міцність.

Для забезпечення поздовжньої стійкості колії необхідно, щоб: 1) діючі на рейкову пліть поздовжні сили не перевищували сил опору переміщенню шпал у баласті; 2) ті самі сили не перевищували сил опору, що забезпечуються рейковими скріпленнями. Тобто поздовжня стійкість колії буде забезпечена, якщо не відбуватиметься спільне поздовжнє переміщення рейок із опорами і не відбуватиметься поздовжнє проковзування підшви рейки по опорах. За вибраною методикою виконано розрахунки та їх порівняння з допустимим погонним опором рейок по підшві, результати лише для одного варіанта досліджень наведено в табл. 1.

Аналіз результатів розрахунків поздовжньої стійкості колії для різних варіантів поєднання характерних

експлуатаційних умов та конструктивних особливостей верхньої будови колії дає можливість стверджувати:

1) для усіх варіантів конструкцій скріплень сумарні розподілені поздовжні сили угону рейкової нитки з урахуванням сумісної дії погонних поздовжніх сил від пружного згину рейки, розподілених поздовжніх температурних сил та розподілених гальмівних сил, які передаються від коліс рухомого поїзда на рейкову нитку при реалізації повного службового гальмування, а також екстреного гальмування, – не перевищують допустимого погонного опору по підшві рейок;

2) особливо несприятливі умови забезпечення поздовжньої стійкості колії спостерігаються при використанні рекуперативного гальмування, зокрема:

- для умов обертання вантажних поїздів масою 4000 т, з 4-вісними вагонами із навантаженнями на вісь 235 кН/вісь при гальмуванні від 90 км/год до 0 км/год; (рейки Р65, залізобетонні шпали, епюра шпал 1840 шт/км, щебеневий баласт) – сумарні розподілені поздовжні сили угону рейкової нитки перевищують допустимий погонний опір по підшві рейок:

- для скріплень типу КПП-1 на 1 %,
- для скріплень типу КБ min на 2 %,
- для інших розрахункових випадків

допустимий погонний опір не перевищується;

- для умов обертання вантажних поїздів масою 4000 т, з 4-вісними вагонами із навантаженнями на вісь 220 кН/вісь і локомотивом ВЛ-82м при гальмуванні від 90 км/год до 0 км/год; (рейки Р65, залізобетонні шпали, епюра шпал 1840 шт/км, щебеневий баласт) – сумарні розподілені поздовжні сили угону рейкової нитки перевищують допустимий погонний опір по підшві рейок лише для скріплень типу КБ min на 1 %, а при інших розрахункових випадках допустимий погонний опір не перевищується.



Таблиця 1

Сили угону для вантажного поїзда масою 4000 т, який складається з 4-вісних вагонів із навантаженням на вісь 235 кН/вісь рейки Р65

Характеристики	Скріплення					
	Фоссло SKL-14	Пендрол	КПП-1 СБ-3	КПП-5	КБ max	КБ min
1	2	3	4	5	6	7
Поздовжня горизонтальна жорсткість основи СШ-б, Н/мм	87968	82726,3	84500	89037,8	94198,8	91913,4
Поздовжня жорсткість вузла скріплення Суз, Н/мм	11500	13000	8320	9700	11300	8000
Сумарна поздовжня жорсткість колії, віднесена до одної опори Соп, Н/мм	9116	9891,3	6951	7964,6	9113,5	6813,7
U <sub>x</sub> , МПа	16,8	18,3	12,9	14,7	16,9	12,6
Δx, мм	0,09	0,114	0,12	0,097	0,087	0,091
$P_{упр}$ , кН/м	1,5	1,9	1,2	1,4	1,5	1,1
$P_{тор}$ , при службовому гальмуванні, кН/м	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
$P_{тор}$ , при екстреному гальмуванні, кН/м	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
$P_{тор}$ , при рекуперативному гальмуванні, кН/м	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
$P_t$ , кН/м	10,6	12,1	7,7	9	10,5	7,4
При службовому гальмуванні Сумарна розрахункова сила угону $\Sigma P_{угон+темл}$ (при сумісній дії усіх поздовжніх сил), кН/м	13,8	15,7	10,6	12,1	13,7	10,2
Те саме при екстреному гальмуванні $\Sigma P_{угон+темл}$ , кН/м	15,4	17,3	12,2	13,7	15,3	11,8
Те саме при рекуперативному гальмуванні $\Sigma P_{угон+темл}$ , кН/м	18,6	20,5	15,4	16,9	18,5	15
Допустимий погонний опір поздовжньому переміщенню рейкової нитки залежно від типу скріплень (відповідно до ЦП/0117)	21,2	23,9	15,3	17,9	20,8	14,7

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Порівняння розрахункових сил уgonу і погонного опору	13,8<21,2 15,4<21,2 18,6<21,2	15,7<23,9 17,3<23,9 20,5<23,9	0,6<15,3 2<15,3 15,4>15,3	12,1<17,9 13,7<17,9 16,9<17,9	13,7<20,8 15,3<20,8 18,5<20,8	10,2<14,7 11,8<14,7 15>14,7

Дослідження проводились на експериментальних ділянках, що мають різні конструктивні характеристики та різні експлуатаційні умови, тому доцільно поділити та згрупувати отримані результати за відповідними ознаками.

У першу чергу отримані результати групуються для різних конструкцій

проміжних скріплень. Для кожної групи виконуємо сортування за зростанням пропущеного тоннажу і відповідними значеннями погонного опору поздовжньому зсуву рейкових ниток, що подано в табл. 2. Результати отриманих залежностей зображено у вигляді стовпчастих діаграм.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень погонного опору поздовжньому зсуву рейкових ниток при скріпленні типу КБ

№ ділянки	Перегін, колія, км ПК	Пропущений тоннаж, млн т. Вантажонапруженість, млн т км бруто/ км за рік	Тип скріплення, % непридатного	Шпали, % непридатних	Параметри проведення випробування		
					Утримуюча поздовжня сила на 1 скріплення, кН/скр	Епюра шпал шп/км	Погонний опір поздовжньому зсуву, що забезпечується скріпленнями, кН/м
1	Могиляни – Кривин парна колія 188 пк 5/6	$\frac{293}{28,8}$	КБ, 9 %	з/б, 0 %	13,8	1840	<b>25,4</b>
2	Київ-Петрівка – Київ-Дніпр. Парна колія 13 пк 4/5	$\frac{316}{24,3}$	КБ, 9%	з/б, без видимих дефектів, 0 %	14,2	1840	<b>26,1</b>
3	Сестринівка-Козятин-1 Непарна колія 1008 пк 4/5	$\frac{342}{66,7}$	КБ 9%	з/б, 0 %	12,3	1840	<b>22,7</b>
4	Рокитне – Сухоліси Непарна колія 54 пк 5-6	$\frac{425}{54,3}$	КБ, 20%	з/б, з дефектами, 5 %	12,5	1840	<b>23</b>
5	Шепетівка – Цвітоха Непарна 152 пк 3/4	$\frac{488}{62,9}$	КБ, 12%	з/б, 0 %	12,0	1840	<b>22,1</b>

Відповідно для ділянок з різними рівнями вантажнапруженості були окремо побудовані залежності погонного опору поздовжньому зсуву рейкових ниток у вигляді стовпчастих діаграм (рис. 2), наведено результати досліджень лише для скріплень КБ.

При оцінюванні працездатності скріплень при їх роботі на утримання рейкових ниток у поздовжньому напрямку, відповідно, й забезпечення поздовжньої стійкості безстикових плітей виникає питання впливу кількості включених в роботу проміжних рейкових скріплень на величину сили опору поздовжньому зсуву та залежності погонного опору від зміни сили притискання рейки до підрейкової основи.

Відповідно при виконанні експериментальних досліджень по довжині рейкових ниток, до яких прикладалось поздовжнє зусилля, залишалась різна кількість працездатних скріплень, що дало можливість зіставити залежності сил опору від кількості прикріплювачів.

Для можливості виконання сумісного аналізу з урахуванням розподілу за рівнем вантажнапруженості та пропущеним тоннажем отримані масиви експериментальних даних відповідним

чином згруповано і подано на рис. 3. Для кожної групи даних щодо вантажнапруженості після відповідної статистичної обробки з використанням регресійного аналізу було отримано лінії тренду та відповідні функціональні залежності погонного опору поздовжньому зсуву рейкових ниток від пропущеного тоннажу. Наведені залежності для скріплень дають змогу зіставити експериментальні залежності погонного опору поздовжньому зсуву рейкових ниток від пропущеного тоннажу з мінімально допустимими значеннями для відповідних типів скріплень.

За отриманими даними було побудовано залежності поздовжніх утримуючих сил від кількості включених у роботу проміжних рейкових скріплень (рис. 4) для різних дослідних ділянок, які відрізняються експлуатаційними умовами та конструктивними особливостями колії. Аналіз проводився для масивів даних, отриманих у кожному окремому експерименті. Шляхом регресійного аналізу методом найменших квадратів було встановлено, що найбільшу точність інтерполяції дає лінійна залежність, при якій коефіцієнт кореляції  $R > 0,9$  відповідає високій збіжності.

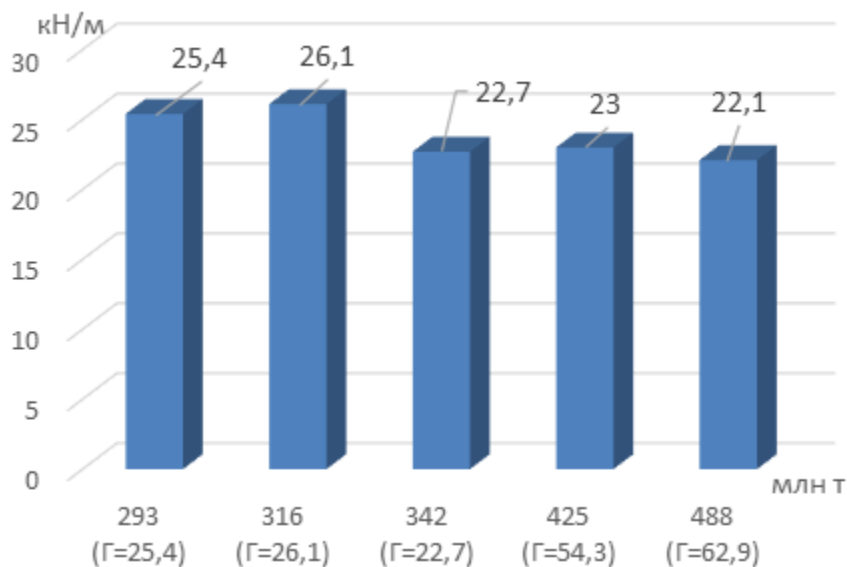


Рис. 2. Графік залежності погонного опору поздовжньому зсуву рейкових ниток від вантажнапруженості і пропущеного тоннажу при скріпленні типу КБ

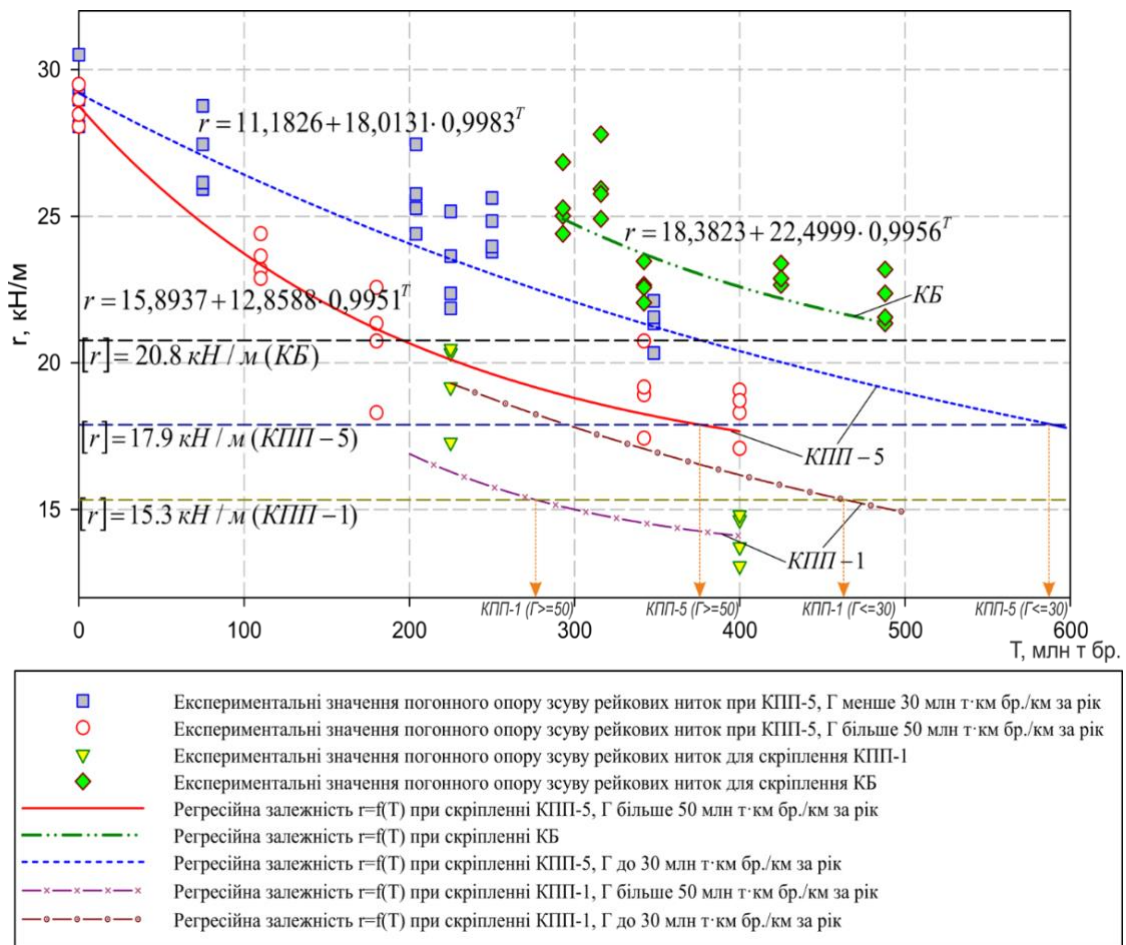


Рис. 3. Графік залежності погонного опору поздовжньому зсуву рейкових ниток від пропущеного тоннажу

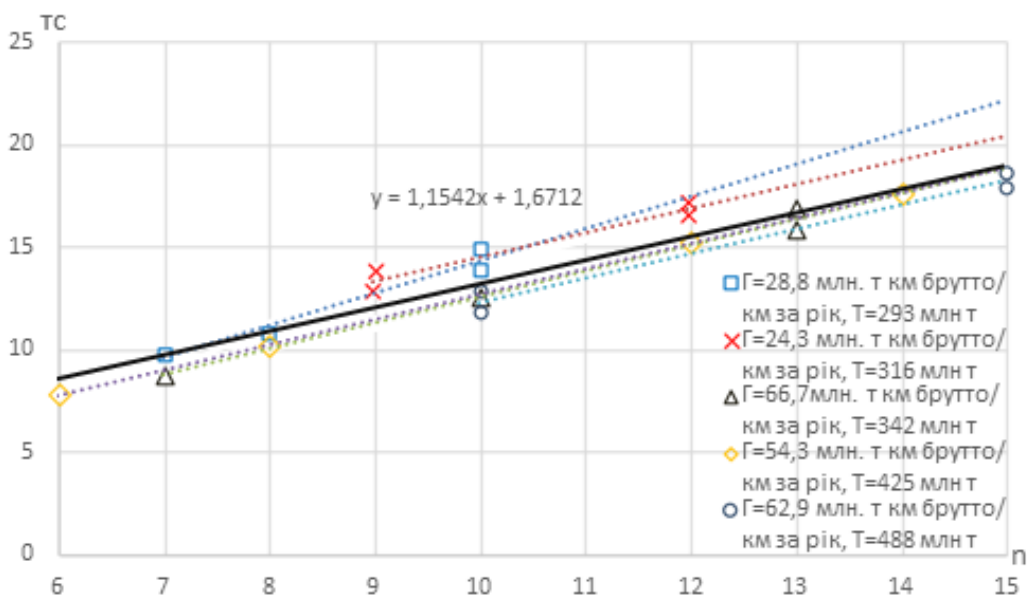


Рис. 4. Залежність поздовжніх утримуючих сил від кількості включених у роботу оміжних рейкових скріплень типу КБ

Для ділянок колії з однаковими умовами експлуатації та конструктивними характеристиками спостерігається практично лінійна залежність поздовжніх утримуючих сил від кількості включених у роботу проміжних рейкових скріплень, тому отримані результати можна екстраполювати для оцінки роботи безстиківих рейкових плітей у цілому без урахування поправок на нелінійність розподілу поздовжніх сил опору по довжині пліті.

**Висновки.** За результатами виконаної роботи щодо поздовжньої стійкості та поздовжніх утримуючих сил встановлено,

що проміжні скріплення типу КПП-5 на початковому періоді експлуатації забезпечують надійне притискання рейкової нитки до підрейкових опор, нічим не поступаючись жорстким скріпленням типу КБ, та забезпечують погонний опір поздовжнім переміщенням рейок близько  $r = 29$  кН/м. У подальшому в процесі експлуатації виявлено поступове зниження погонного опору поздовжнім переміщенням залежно від пропущеного тоннажу, а також від інтенсивності руху рухомого складу, тобто від вантажонапруженості ділянки.

### Список використаних джерел

1. Альбрехт В. Г., Коган А. Я. Угон железнодорожного пути и борьба с ним / Министерство путей сообщения РФ. Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. Москва: Транспорт, 1996. 160 с.
2. Дослідження впливу вантажонапруженості й плану колії на працездатність пружного проміжного скріплення типу КПП-5 та шпали типу СБЗ і розробка рекомендацій щодо їх удосконалення: звіт про науково-дослідну роботу. Дніпро: ДНКТБКГ, 2016. 87 с.
3. Мойсеєнко К. В., Суслів В. М., Татуревич А. А. Обґрунтування необхідності скасування обмеження застосування скріплення типу КПП-5 за критерієм вантажонапруженості. *Залізничний транспорт України: наук.-практ. журнал*. 2017. № 2. С. 55–64.
4. Скріплення проміжні пружні типу КПП-5: ТУ У 35.2-30268559-118:2009. 41 с.
5. Маркуль Р. В. Розробка технології контролю та утримання залізничної колії зі скріпленням типу КПП-5. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України*. Серія «Транспортні системи і технології». Київ: ДЕТУТ, 2015. Вип. 26–27. С.58–68.
6. Slobodyanyuk M., Gorobchenko O. Structural analysis of territorial transport systems based on classification methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. No. 4 (103). P. 23–32. URL:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.194158> (last access: 02.12.2021).

Бойко Володимир Дмитрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9192-8394>. Тел.+38(097)133-70-64. E-mail:boykovd69@gmail.com.

Потапов Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID: 0000-0002-7279-4271. Тел. +38(057)730-10-60. E-mail:ppx\_xiit@kart.edu.ua.

Молчанов Віталій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0272-1277>. Тел. +38(96)597-70-22. E-mail:vitolch@gmail.com.

Демченко Володимир Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць Державного університету інфраструктури та технологій. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2478-364X>. Тел.: +38(097)287-17-63. E-mail: dem4enko.vo@gmail.com.

Демченко Олексій Володимирович, аспірант кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5344-9301>. тел.: +38(067)888-55-20. E-mail: mr.lyoshyk@gmail.com.

Volodymyr Boyko Ph.D. tech. sciences, Associate Professor of the Department of Railway Track and Track Management of the State University of Infrastructure and Technology. ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-9192-8394>. Тел.+38(097)133-70-64. E-mail:boykovd69@gmail.com.

Dmytro Potapov Ph.D. tech. sciences, Associate Professor of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: 0000-0002-7279-4271. Тел. +38(057)730-10-60. E-mail:ppx\_xiit@kart.edu.ua.

Vitaliy Molchanov Ph.D. tech. sciences, Associate Professor of the Department of Railway Track and Track Management of the State University of Infrastructure and Technology. ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0272-1277>. Тел. +38(96)597-70-22. E-mail:vitmolch@gmail.com.

Volodymyr Demchenko Ph.D. tech. sciences, Associate Professor of Electromechanics and Rolling Stock of the State University of Infrastructure and Technology. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2478-364X>. Тел.: +38(097)287-17-63. E-mail: dem4enko.vo@gmail.com.

Oleksii Demchenko is a postgraduate student of the Department of Railway Track and Track Management of the State University of Infrastructure and Technologies. ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-5344-9301>. Тел.: +38(067)888-55-20. E-mail: mr.lyoshyk@gmail.com.

Статтю прийнято 21.10.2021 р.

УДК 625.143:656.027 (477)

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОМІЖНОГО РЕЙКОВОГО СКРІПЛЕННЯ ТИПУ КПП-5 НА ПЕРСПЕКТИВНИХ ДІЛЯНКАХ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ, ДЕ ПЛАНУЄТЬСЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ШВИДКІСНОГО РУХУ

Кандидати техн. наук Д. О. Потапов, В. Г. Вітольберг, В. Д. Бойко, В. В. Новіков

## THEORETICAL STUDIES OF THE POSSIBILITY OF OPERATING AN INTERMEDIATE RAIL FASTENING OF THE KPP-5 TYPE ON PROMISING SECTIONS OF UKRAINIAN RAILWAYS, WHERE IT IS PLANNED TO INTRODUCE HIGH-SPEED TRAFFIC

PhD (Tech.) D. Potapov, PhD (Tech.) V. Vitolberg, PhD (Tech.) V. Boyko,  
PhD (Tech.) V. Novikov

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256640>

---

*Анотація.* У статті наведено результати багатоваріантних розрахунків напружень, які виникають в елементах залізничної колії під дією сучасних типів швидкісного рухомого складу. Встановлено, що з точки зору міцності проміжні рейкові скріплення типу КПП-5 українського виробництва можуть експлуатуватись у прямих ділянках зі швидкостями більше 160 км/год з термічно обробленими рейками типу Р65 на залізобетонних шпалах з епурою укладання 1840 шт/км із щебеневим баластом товщиною 40 см. Аналітичне порівняння рівня напружень, що виникають в елементах залізничної колії в прямих із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва та системою прикріплення рейок W30 виробництва компанії «Vossloh», показало приблизно той самий рівень напруженого стану в елементах залізничної колії.

*Ключові слова:* швидкісний рух, проміжні рейкові скріплення, розрахунки залізничної колії на міцність.

**Abstract.** *The introduction of high-speed traffic in the railways of Ukraine is one of the priority areas of development of the domestic railway industry. Foreign experience in the operation of high-speed and high-speed lines has a positive impact on the overall economic performance of these countries by increasing the mobility of means of production and human resources. In addition, increasing speeds requires the introduction of new types of rolling stock and railway structures with unconditional provision of the required level of safety. This is possible only through a comprehensive approach to these issues, both through experimental tests and theoretical calculations. This study theoretically assessed the possibility of operating intermediate rail fasteners type KPP-5 Ukrainian production in areas where in the medium term, it is planned to increase speeds, i.e. to reach a level of more than 160 km/h. To achieve this goal, multivariate calculations were performed to determine the stress state that penetrates the elements of the railway track under the action of rolling stock. Four types of high-speed locomotives and electric trains, which have been operated on the railway lines of the European Union for a long time, were selected as units of account in the study. For all types of rolling stock (locomotives and high-speed electric trains) for which calculations were performed, the obtained values of stresses acting in the elements of the railway track do not exceed the allowable. That is, in terms of strength, intermediate rail fasteners type KPP-5 Ukrainian production can be operated in straight sections at speeds over 160 km / h with heat-treated rails type R65 on reinforced concrete sleepers with laying diagram 1840 pcs / km with gravel ballast 40 cm thick. Analytical comparison of the level of stresses arising in the railway track elements in lines with intermediate rail fastening type KPP-5 made in Ukraine and the W30 rail fastening system manufactured by Vossloh showed approximately the same level of stress in the railway track elements. However, it should be noted that the above conclusions are only theoretical in nature and for the final determination of the possibility of operation of the intermediate rail fastening type KPP-5 in real conditions (at speeds greater than 160 km / h) requires additional experimental studies.*

**Keywords:** *high-speed traffic, intermediate rail fastenings, calculations of railway track for strength.*

**Вступ.** Одним з пріоритетних напрямів розвитку залізничного транспорту України є підвищення швидкості руху пасажирських поїздів та подальше впровадження швидкісного, а в середньостроковій перспективі й високошвидкісного руху як у межах України, так і в сполученні між Україною та країнами Західної Європи. Загальновідомим фактом, який підтверджено багатьма дослідниками, є доволі суттєві відмінності в процесах взаємодії залізничної колії і рухомого складу на ділянках швидкісного і високошвидкісного руху. Це викликає необхідність розробляти нові інженерно-технічні рішення стосовно рухомого складу, залізничної інфраструктури, засобів сигналізації тощо, але насамперед впроваджувати нові елементи саме в конструкцію залізничної колії.

Невід’ємною конструктивною складовою, яка доволі суттєво впливає на процеси взаємодії залізничної колії та рухомого складу, а також безпосередньо бере участь у формуванні просторової жорсткості підрейкової основи, є вузли проміжних рейкових скріплень. За своїми конструктивними особливостями їх умовно можна розподілити на дві основні групи – ті, що мають металеву підкладку, та без неї (так звані безпідкладкові). Світові тенденції свідчать, що саме група безпідкладкових рейкових скріплень є перспективною як з точки зору оптимізації жорсткісних характеристик колії, так і в питаннях техніко-економічної ефективності (за рахунок економії металу при виготовленні, зменшенні витрат на поточне утримання тощо).

На сьогодні основним типом пружних безпідкладкових проміжних рейкових скріплень, виходячи з протяжності ділянок

укладання, на вітчизняних магістральних залізницях є проміжні рейкові скріплення типу КПП-5 українського виробництва. Тому, на наш погляд, доволі логічно розглядати саме цей тип скріплень, як реального «претендента» для експлуатації на ділянках швидкісного руху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У загальному випадку несуча здатність окремих елементів залізничної колії забезпечується за умови неперевикнення розрахунковими напруженнями рекомендованого допустимого рівня в цих елементах. З огляду на це можна зробити висновок, що першою умовою можливості експлуатації відповідного типу проміжних рейкових скріплень є забезпечення необхідного рівня несучої здатності як окремими конструктивними елементами колії (рейки, шпали, баластний шар, основна площадка земляного полотна), так і конструкції в цілому.

Сама теорія розрахунків залізничної колії на міцність історично розвивалася за напрямками удосконалення розрахункової схеми та методики імовірнісного розрахунку. Цю довгу історію можна відслідковувати починаючи ще з XIX століття, що докладно показано в роботах [1, 2].

Основа сучасних розрахунків колії на міцність була розроблена ще у 1954 р. [3] колективом авторів у складі М. Ф. Веріго, В. М. Данилова, Є. М. Бромберга та ін. Передумови аналітичних розрахунків рейки як балки на пружній основі також були закладені в роботі проф. С. П. Тимошенка [4]. У 1986 р. вийшла праця проф. М. Ф. Веріго і А. Я. Когана «Взаємодія колії і рухомого складу» [5], яка вважається фундаментальною з вирішення задач розрахунків колії на міцність, у тому числі з використанням просторових розрахункових схем.

Крім того, слід зазначити праці українських вчених – проф. М. Б. Кургана і Д. М. Кургана [6–9], які розробили методологію розрахунків залізничної колії при взаємодії зі швидкісним рухомим


складом, що, безперечно, буде сприяти впровадженню швидкісного, а в перспективі й високошвидкісного руху поїздів як в Україні, так і в сполученні між Україною та країнами Західної Європи.

Особливе місце займають наукові праці Заслуженого діяча науки і техніки України, проф. Е. І. Даніленка, під керівництвом якого були розроблені вітчизняні «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість», які на сьогодні є чинним офіційним документом у нормативній базі АТ «Укрзалізниця».

**Визначення мети та завдання досліджень.** Основною метою дослідження є оцінка можливості експлуатації проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 на перспективних ділянках головних колій АТ «Укрзалізниця», де планується впровадження швидкісного руху. Виходячи з чого, одним із основних завдань було визначити напружений стан залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням цього типу при швидкостях руху більше 160 км/год з огляду на особливості конструкції сучасних типів швидкісного рухомого складу.

**Основна частина.** Для оцінки напруженого стану в елементах залізничної колії було використано основні положення [10], згідно з якими динамічне навантаження враховується через відповідне визначення розрахункової сили, за яку приймається максимальна вірогідна сила з імовірністю неперевикнення 0,994 ( $\lambda = 2,5$ ), що складається зі статичного навантаження та комплексу динамічних добавок:

$$P_{розр} = \bar{P} + \lambda \cdot S, \quad (1)$$

де  – середнє значення сили, що діє від колеса на рейку;

$S$  – середньоквадратичне відхилення сили, що діє від колеса на рейку.

У практичних розрахунках колії на міцність показники сили, що діє від колеса на рейку, визначаються за формулою:



$$\begin{cases} \bar{P} = P_{cm} + \bar{P}_p \\ S = \sqrt{S_p^2 + S_{pn}^2 + 0,05 \cdot S_{инк}^2 + 0,95 \cdot S_{бнк}^2} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $P_{cm}$  – вага екіпажа, віднесена до одного колеса (статичне навантаження);

$\bar{P}_p$  – середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа;

$S_p^2$  – середньоквадратичне відхилення сили від коливань надресорної ваги екіпажа;

$S_{pn}^2$  – середньоквадратичне відхилення сили від перекочування колеса по рейці з нерівністю;

$S_{инк}^2$  – середньоквадратичне відхилення сили, що виникає від наявності на колесі ізольованої нерівності;

$S_{бнк}^2$  – середньоквадратичне відхилення сили, що виникає від наявності на колесі безперервної нерівності.

Напруження в рейках (по осі підшви  $\sigma_{o-n}$  та головки  $\sigma_{o-z}$ ) від дії згинального моменту  $M_{дин}$  визначається за формулами:

$$\sigma_{o-n} = \frac{M_{дин}}{W_n}, \quad \sigma_{o-z} = \frac{M_{дин}}{W_z}, \quad (3)$$

де  $W_n$  і  $W_z$  – момент опору рейки, відповідно по низу підшви і по верху головки.

Для врахування позацентрового прикладення вертикальних сил та дії горизонтальних поперечних сил у розрахунку вводяться спеціальні коефіцієнти  $m_{к-з}$  і  $f$ . Таким чином, напруження в кромках головки  $\sigma_{к-з}$  та підшви  $\sigma_{к-n}$  рейок можна визначити як

$$\sigma_{к-з} = m_{к-з} \cdot \sigma_{o-n} \quad \sigma_{к-n} = f \cdot \sigma_{o-n} \quad (4)$$

Коефіцієнти  $f$  знаходяться з довідкових таблиць [10] залежно від типу рухомого складу і плану лінії. Величину

перехідного коефіцієнта  $m_{к-з}$  можна розрахувати як

$$m_{к-з} = \frac{Z_z}{Z_n} + (f-1) \frac{b_z}{b_n}, \quad (5)$$

де  $b_z$ ,  $b_n$  – відповідно ширина головки і підшви рейки;

$Z_z$ ,  $Z_n$  – відстань від центральної горизонтальної осі до верху головки і низу підшви відповідно.

Напруження зминання в шпалах під підкладкою (прокладкою) визначаються залежно від величини сили тиску рейки на опору  $Q_{дин}$ :

$$\sigma_{ш} = \frac{Q_{дин}}{\omega} \cdot 10, \quad (6)$$

де  $\omega$  – площа підкладки (або підрейкової прокладки).

Напруження стискання в баласті під шпалою також залежать від величини сили тиску рейки на опору  $Q_{дин}$ :

$$\sigma_{\delta} = \frac{Q_{дин}}{\Omega \cdot \alpha} \cdot 10, \quad (7)$$

де  $\Omega \alpha = \frac{1}{2} \alpha \cdot a \cdot b$  – ефективна опорна площа напівшпали з урахуванням її згину ( $a$ ,  $b$  – довжина шпали і ширина нижньої її постелі,  $\alpha$  – коефіцієнт згину шпали).

Величину напружень у баласті  $\sigma_{\delta(h)}$  на будь-якій глибині  $h$ , у тому числі і на основній площадці земляного полотна, прийнято визначати як

$$\sigma_{\delta(h)} = \sigma_{h_p} + \sigma_{hc_2} + \sigma_{hc_3}, \quad (8)$$

де  $\sigma_{h_p}$  – напруження в розрахунковій точці від тиску розрахункової шпали, Па;

$\sigma_{hc_2}$  – напруження в тій самій точці  $M$  від тиску однієї сусідньої шпали (розташованої ліворуч від розрахункової), Па;

$\sigma_{hc_3}$  – напруження в тій самій точці  $M$  від тиску іншої сусідньої шпали (розташованої праворуч від розрахункової), Па.

Як розрахункові екіпажі в рамках цього дослідження було прийнято рішення розглянути два типи рухомого складу – локомотиви та швидкісні електропоїзди (з конструкційною швидкістю більше 160 км/год).

Виходячи з дійсно великої різноманітності у світі видів рухомого складу для таких швидкостей руху, питання вибору конкретної рухомої одиниці було непростим. З одного боку, одним із факторів, який суттєво обмежував підбір екіпажів для проведення розрахунків, була

відсутність у відкритих джерелах необхідної технічної інформації, а з іншого – навіть маючи таку можливість, кількість розрахункових одиниць була б надмірно великою, що явно виходило за рамки даного теоретичного дослідження. З огляду на це для проведення розрахунків було обрано по 4 рухомих одиниці для кожної категорії (локомотиви та швидкісні електропоїзди). Хоча процес вибору і мав умовно суб'єктивний характер, але, по можливості, було враховано досвід експлуатації та характерні особливості в їхній конструкції. В табл. 1 наведено загальні відомості про рухомий склад [11–19], який було обрано для проведення розрахунків.

Таблиця 1

Основні технічні характеристики рухомого складу, який було обрано для проведення розрахунків

Вид рухомої одиниці	Статичне навантаження на рейки від колеса, кг	Діаметр колеса, см	База візка, см	Конструкційна швидкість, км/год
Локомотиви				
1	ЧС200	9750	125	200
2	KZ4A	10250	125	200
3	ЭП20	10750	125	200
4	Травса	9000	101	260
Швидкісні електропоїзди				
1	Siemens Velaro RUS	8475	92	260
2	Stadler FLIRT 200	10000/8500	моторного візка 86 немоторного 80 мм	моторний 270 інші 275
3	Sm6 «Аллегро»	8500	98	270
4	Talgo 250	9000	101	280

Одразу необхідно зауважити, що згідно з викладеною методикою розрахунку колії на міцність вплив бокових сил враховується емпіричними коефіцієнтами для відповідної рухомої одиниці. В реальних експлуатаційних умовах вплив бокових сил (а також низку інших показників розрахункового екіпажа)

доцільно визначати (уточнювати) тільки експериментальними методами для конкретних ділянок колії, особливо це стосується саме ділянок зі швидкостями руху більше 160 км/год. Виходячи з цього, в рамках даного дослідження з об'єктивних причини не було можливості оцінити напружений стан залізничної колії із

проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва в кривих.

Тому як основну для розрахунків було обрано пряму ділянку з безстиковою конструкцією з новими рейками типу Р65 (з термічною обробкою), шпали залізобетонні (типу СБ-3-0) з епюрою 1840 шт/км, проміжне скріплення КПП-5, двошарова баластна призма (товщина щебеню – 40 см).

Для проведення розрахунків у комплексі «Mathcad» розроблено програму з урахуванням теоретичних передумов, які було наведено вище. Розрахунки виконано для всіх обраних типів рухомого складу з урахуванням сезонності.

Попередній аналіз отриманих результатів показав, що максимальні напруження в кромці головки та підшви рейок виникають у літній період, на відміну від напружень під прокладкою (на шпалі), в баластному шарі та основній площадці земляного полотна, де максимум спостерігається в зимовий період.

Найбільш «близькі» до допустимих значень є величини напружень, які виникають у кромці підшви рейок, з чого стає очевидним, що саме цей параметр може вважатися найбільш впливовим з точки зору обмеження швидкості в обраних умовах проведення розрахунків. Також необхідно зауважити, що при швидкостях руху більше 160 км/год можуть експлуатуватися лише рейки з термічною обробкою, оскільки отримані результати свідчать, що для швидкості 140 км/год величина напружень у кромці підшви рейок перевищує допустимий рівень для рейок без термічної обробки.

Для систематизації отриманих результатів було складено зведену табл. 2, в якій за кожною одиницею рухомого складу наведено величини максимальних напружень, що виникають в елементах залізничної колії при максимальній швидкості (в даному випадку йдеться про величину конструкційної швидкості).

Таблиця 2

Результати розрахунків напружень, що виникають в елементах залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва

Тип рухомого складу	Конструкційна швидкість, км/год	Напруження в елементах залізничної колії, МПа				
		кромка головки рейки	кромка підшви рейки	під прокладкою на шпалі	в баласті	на основній площадці
ЧС200	220	285	274	2,32	0,180	0,056
KZ4A	200	261	249	2,33	0,181	0,056
ЭП20	200	269	257	2,45	0,190	0,059
Travca	260	282	271	2,29	0,178	0,055
Siemens Velaro RUS	250	273	262	2,14	0,167	0,052
Stadler FLIRT 200	200	261	249	2,35	0,182	0,057
Smб «Аллігро»	220	263	253	1,95	0,151	0,047
Talgo 250	250	275	264	2,16	0,168	0,052

Зважаючи на дані табл. 2, можна констатувати, що величина максимальних напружень у кромці головки рейок

змінюється в межах від 261 до 285 МПа для локомотивів і від 261 до 275 МПа – для швидкісних поїздів. Діапазони значень

максимальних напружень у кромці подошви рейок становлять від 249 до 274 МПа і від 249 до 264 МПа для локомотивів та швидкісних поїздів відповідно. Мінімальна різниця між значеннями допустимих напружень у кромці головки рейки і отриманими в результаті розрахунку складає 6 МПа для локомотива ЧС2000 при швидкості руху 220 км/год (9 МПа для локомотива «Травса» при швидкості руху 260 км/год), тобто майже на самій «межі» допустимих значень.

Отримані значення напружень під прокладкою (на шпалі), в баластному шарі, на основній площадці земляного полотна свідчать про існування певного запасу міцності, наприклад, теоретичної можливості використання полегшеної епюри шпал (1680 шт/км) або зменшення товщини баластного шару.

Величина максимально можливої швидкості руху по прямим ділянках залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва може дорівнювати конструкційній швидкості відповідної рухомої одиниці і становить від 200 до 260 км/год.

*Порівняльний аналіз результатів розрахунків.* Сьогодні на залізничному транспорті країн близького та далекого зарубіжжя в експлуатації є широкий спектр безпідкладкових проміжних рейкових скріплень. Наприклад, рейкові скріплення компанії «Pandrol», АРС-4, ЖБР-65, системи для прикріплення рейок компанії «Vossloh» та багато інших.

Усі вони мають свої переваги і недоліки [20–22], так само, як і проміжне рейкове скріплення КПП-5 українського виробництва. Тому метою проведення цього аналізу не є визначення, так би мовити, «слабких сторін» українського (або закордонного) скріплення, а лише порівняння отриманих результатів розрахунків із сучасними світовими аналогами.

Для порівняльного аналізу було обрано проміжне рейкове скріплення «Vossloh» (зокрема система для

прикріплення рейок W30 для баластної конструкції колії), яке в різних модифікаціях експлуатуються вже досить давно на залізницях світу.

Оскільки визначення напруженого стану в елементах залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва проводилось для прямих ділянок колії, наявність бокових упорів, спосіб прикріплення рейки до шпали (шурупами), розбіжності в характеристиках пружної клеми в системі прикріплення рейки до шпали W30 не є суттєвими з точки зору обраної методики розрахунків.

На нашу думку, в цьому випадку головною відмінністю системи W30 від проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 можна вважати імовірну різницю у величині модуля пружності підрейкової основи. Загальновідомо, що цей параметр може бути визначений лише експериментально і на сьогодні немає відомостей (зокрема в «Правилах розрахунку залізничної колії на міцність і стійкість») щодо його реальних значень. Тому, спираючись на відмінності в пружних характеристиках підрейкових прокладок проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 українського виробництва та системи W30, авторами було проведено аналогічні багатоваріантні розрахунки, в яких аналітично варіювалося (як у бік збільшення, так і зменшення) значення саме модуля пружності підрейкової основи, а також окремі геометричні показники, які відповідають основним характеристикам системи прикріплення рейок W30.

Як приклад у табл. 3 наведено результати одного з таких варіантів розрахунків.

Виходячи з даних табл. 3, можна зазначити, що загальний напружений стан в елементах залізничної колії майже не змінився. Спостерігається незначне зниження рівня напружень у рейках та несуттєве зростання в інших конструктивних елементах колії. Але всі ці значення теж менші за допустимі.

Це дає змогу зробити припущення про певну конкурентоспроможність вітчизняного скріплення порівняно із закордонним,

хоча, звісно, це потребує проведення окремих техніко-економічних розрахунків.

Таблиця 3

Результати розрахунків напружень, що виникають в елементах залізничної колії із системою прикріплення рейок W30 компанії «Vossloh»

Тип рухомого складу	Конструкційна швидкість, км/год	Напруження в елементах залізничної колії, МПа				
		кромка головки рейки	кромка підшви рейки	під прокладкою на шпалі	в баласті	на основній площадці
ЧС200	220	282	271	2,42	0,188	0,058
KZ4A	200	258	247	2.43	0.189	0.058
ЭП20	200	267	255	2.56	0.199	0.062
Travca	260	280	269	2.397	0.186	0.058
Siemens Velaro RUS	250	271	261	2,24	0,174	0,054
Stadler FLIRT 200	200	259	247	2.454	0.191	0.059
Sm6 «Аллегро»	220	261	251	2.037	0.158	0.049
Talgo 250	250	273	262	2.259	0.175	0.054

**Висновки.** Проведені розрахунки напруженого стану залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва дають змогу зробити такі висновки:

1. Для всіх типів рухомого складу (локомотиви та швидкісні електропоїзди), для яких було проведено розрахунки, отримані значення напружень, що діють в елементах залізничної колії, не перевищують допустимих. Тобто з точки зору міцності проміжні рейкові скріплення типу КПП-5 українського виробництва можуть експлуатуватись у прямих ділянках зі швидкостями більше 160 км/год з термічно обробленими рейками типу Р65 на залізобетонних шпалах з епюрою укладання 1840 шт/км із щебеневим баластом товщиною 40 см.

2. Фактором, який суттєво впливає (в деяких випадках обмежує) на швидкість руху по залізничній колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва є величина напружень у кромці підшви рейки.

Величини інших напружень (у кромці головки рейки, під прокладкою (на шпалі), в баласті і на основній площадці земляного полотна) не перевищують допустимих за всіма діапазонами швидкостей, для яких проводились розрахунки.

3. Аналітичне порівняння рівня напружень, що виникають в елементах залізничної колії в прямих із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва та системою прикріплення рейок W30 виробництва компанії «Vossloh», показало приблизно той самий рівень напруженого стану в елементах залізничної колії.

4. Максимальна швидкість руху поїздів по прямих ділянках залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва дорівнює конструкційній швидкості відповідної рухомої одиниці і перебуває в межах від 200 до 260 км/год.

Усі вищенаведені висновки мають лише теоретичний характер. Для

остаточного визначення максимально можливої швидкості руху по конкретних ділянках залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 українського виробництва в реальних умовах експлуатації (при швидкості руху більше 160 км/год) необхідне проведення додаткових експериментальних досліджень.

Метою проведення цих експериментальних робіт є оцінка (або уточнення,

виходячи із конкретних експлуатаційних умов) окремих характеристик верхньої будови колії та рухомого складу, оскільки при швидкостях руху більше 160 км/год процеси взаємодії екіпажів та залізничної колії вже мають істотні особливості, які потрібно враховувати і досліджувати лише в експериментальному порядку.

### Список використаних джерел

1. Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомих складом: підруч. для вищ. навч. закл.: у 2 т. Київ: Інпрес, 2010. Т. 2. 456 с.
2. Даренський О. М., Беліков Е. А. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничних колій. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2016. № 154. С. 149–55.
3. Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность. Москва: Трансжелдориздат, 1954. 70 с.
4. Тимошенко С. П. Прочность и колебания элементов конструкций. Москва: Наука, 1975. 704 с.
5. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. Москва: Транспорт, 1986. 559 с.
6. Kurhan M. B., Kurhan D. M. Theoretical basis for the introduction of high-speed trains in Ukraine (DNUZT, Dnipro, 2016). 283 p.
7. Kurhan D., Kurhan M. Modeling the Dynamic Response of Railway Track // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 708. p. 012013. doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012013.
8. Kurhan M., Kurhan D. Problems of providing international railway transport. *Matec*. 2018. Vol. 230. P. 01007. doi: 10.1051/mateconf/201823001007.
9. Курган М. Б., Курган Д. М. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні: монографія. Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2016. 283 с.
10. Даніленко Е. І., Рибкін В. В. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. ЦП-0117. Київ: Транспорт України, 2004. 64 с.
11. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособ.: в 2 т. / И. П. Киселев и др.; под ред. И. П. Киселева. Москва: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. Т. 2. 272 с.
12. Velaro RUS-High-Speed Trains. URL: <https://press.siemens.com/global/en/feature/velaror-rus-high-speed-trains-russian-railways>.
13. Stadler FLIRT 200 (ЭПМ). URL: <http://history.rw.by/lokomotivy/epm/>.
14. Sm6 «Аллегро». URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Allegro\\_\(электропоезд\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Allegro_(электропоезд)).
15. Talgo 250. URL: <https://www.talgo.com/en/rolling-stock/high-speed/250/>.
16. Locomotive Travca. URL: <https://www.talgo.com/en/rolling-stock/locomotives/travca/>.
17. Электровоз ЭП20 – руководство по эксплуатации. URL: [https://zinref.ru/000\\_uchebniki/05301\\_transport\\_jd\\_elektrovozi/000\\_00\\_ep\\_20\\_elektrovoz\\_rukovodstvo/000.htm](https://zinref.ru/000_uchebniki/05301_transport_jd_elektrovozi/000_00_ep_20_elektrovoz_rukovodstvo/000.htm).
18. Правила эксплуатации электровозов серии KZ4A. URL: <https://ktzh-gp.kz/upload/iblock/b09/fxqsgadnabwpzu%20.lbwszyjyuvgtzjacofaeyhfc%20ugdrvdllhfaegjbejvesvgh%20bhmaorcjxg%20KZ4A.pdf>.

19. Электровоз постоянного тока: ЧС200. URL: <https://sites.google.com/site/tagapoezd/tagsredstva/chs200>.
20. Даренський О. М., Беліков Е. А Перспективні конструкції проміжних скріплень для умов промислового залізничного транспорту. *ІКСЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2015. № 2. С .57–61.
21. Анкерное бесподкладочное промежуточное рельсовое скрепление АРС. Московский Государственный Университет Путей Сообщения (МИИТ). Москва, 2008. 34 с.
22. Онищенко В. Упругие рельсовые скрепления компании Vossloh. *Українські залізниці*, 2014. № 8 (14). С. 60–64.
- 

Потапов Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7279-4271. Тел. +38 (057)730-10-60. E-mail: ppx\_xiit@kart.edu.ua.

Вітольберг Володимир Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії і транспортних споруд Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7356-8316. Тел. +38 (057)730-10-60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Бойко Володимир Дмитрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000-0002-9192-8394. Тел. +38 (044)591-51-47. E-mail: zkks@ukr.net.

Новіков Вадим Володимирович, кандидат технічних наук, старш. 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.

Potapov Dmytro PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and transport facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7279-4271. Tel. +38 (057)730-10-60. E-mail: ppx\_xiit@kart.edu.ua.

Vitolberg Volodymyr PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and transport facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7356-8316. Tel. +38 (057)730-10-60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Boyko Volodymyr PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and track facilities State University of Infrastructure and Technologies ORCID iD: 0000-0002-9192-8394. Tel. +38 (044)591-51-47. E-mail: zkks@ukr.net.

Novikov Vadym, PhD (Tech.), 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.

Статтю прийнято 15.12.2021 р.

**ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)**

---

---

УДК 502.4:528.4:004.9

**КОНЦЕПТУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІС ПЕРВИННОГО ОБЛІКУ КАДАСТРУ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ (НА ПРИКЛАДІ НАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКУ «НИЖНЬОСУЛЬСЬКИЙ»)**

Канд. біол. наук Н. П. Гальченко, кандидати техн. наук В. І. Козарь, П. Б. Міхно, О. М. Клюка

**CONCEPTUAL MODELING OF GIS OF THE PRIMARY ACCOUNTING OF THE CADASTRE OF THE NATURE RESERVE FUND (ON THE EXAMPLE OF THE NIZHNYOS NATIONAL NATURE PARK)**

PhD (Biol.) N. Halchenko, PhD (Tech.) V. Kozar, PhD (Tech.) P. Mikhno, PhD (Tech.) L. Klyuka

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256642>

---

***Анотація.** У статті викладено результати аналізу використання території НПП «Нижньосульський» і кадастру територій та об'єктів природно-заповідного фонду як об'єкта інформатизації. За результатами аналізу запропоновано набір базових просторових даних системи і розроблено концептуальну модель бази тематичних геопросторових даних для первинного обліку кадастрових відомостей. Схема подана з використанням нотацій уніфікованої мови моделювання UML.*

***Ключові слова:** кадастр, природно-заповідний фонд, геоінформаційні технології, концептуальна модель даних.*

***Abstract.** The article presents the results of conceptual modeling of the database of thematic geospatial data for the primary accounting of cadastral information. Lands of the nature reserve fund have a special nature conservation value. According to the results of accounting, survey and inventory of natural complexes, assessment of the state of nature reserve facilities form "Cards of primary accounting of territories and objects of nature reserve fund of Ukraine". Other documents of the cadastre of territories and objects of the nature reserve fund are created by generalizing the data of these cards. Nizhnosulsky National Nature Park was created to preserve valuable natural and historical-cultural complexes and objects of the Middle Dnieper. It covers an area of 18,635.11 hectares. The rare fraction of the park's flora includes 13 species of vascular plants, including 10 species listed in the Red Book of Ukraine. The Green Book of Ukraine includes 9 formations found in the park. In the park, taking into account the value of natural complexes and objects, there are four functional zones: protected area; regulated recreation; inpatient recreation; economic. Based on the results of the analysis of the resources of the Nizhnosulsky National Nature Park and the cadastre of the nature reserve fund as an object of informatization, a conceptual scheme of the thematic geospatial database was compiled. The set of basic spatial data of such a system is proposed to include information on coordinate and altitude systems, administrative-territorial units, territorial communities, hydrographic objects and hydraulic structures, settlements, buildings and structures, roads, railways, utilities, soils, land plots, geographical names, relief, orthophotos. The set of thematic data should include information on NPF objects, their functional zoning, land plots and*



*lands, owners and users of land plots, economic activities, landscapes, rare types of environments, conservation objects, recreational value, as well as rare species of plants and animals. According to the research results, a UML-diagram of the conceptual model of the thematic geospatial database of GIS of the primary accounting of the cadastre of the nature reserve fund was created.*

**Keywords:** *cadastre, nature reserve fund, geoinformation technologies, conceptual data model.*

**Вступ.** Землі природно-заповідного фонду (ПЗФ) мають особливу природоохоронну цінність і є важливим інструментом збереження біорізноманіття. Правовий режим територій та об'єктів ПЗФ визначається Земельним кодексом України та Законами України «Про природно-заповідний фонд України» та «Про охорону навколишнього природного середовища України». Зокрема, Закон України [1] визначає основні положення щодо управління в галузі охорони і використання ПЗФ, режиму територій та об'єктів ПЗФ, економічного забезпечення діяльності функціонування ПЗФ, порядку створення об'єктів ПЗФ, ведення кадастру територій та об'єктів ПЗФ і відповідальність за порушення законодавства у цій сфері.

З метою оцінювання складу, стану та перспектив розвитку природно-заповідного фонду ведеться відповідний кадастр. Державний кадастр територій та об'єктів природно-заповідного фонду включає геопросторові дані, метадані та сервіси, оприлюднення, інша діяльність з якими та доступ до яких здійснюються у мережі Інтернет згідно із Законом України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» [2]. Складання документації Державного кадастру територій та об'єктів природно-заповідного фонду України здійснюється згідно з «Інструкцією про зміст та складання документації державного кадастру територій та об'єктів природно-заповідного фонду України» [3]. Первинний облік кадастрових відомостей щодо територій та об'єктів природно-заповідного фонду здійснюють адміністрації відповідних об'єктів та інші підприємства, установи та організації, у віданні яких перебувають такі об'єкти.

Про важливість розвитку природоохоронної діяльності в Україні свідчать також зміни, що вносились останнім часом до нормативно-правових актів у сфері землеустрою та кадастру. Зокрема, Постановою № 134 від 20 лютого 2020 року у «Порядку ведення Державного земельного кадастру» [4] назву територіальної зони «Ключові території екомережі» (код 0.16) доповнено словами «(території та об'єкти природно-заповідного фонду та ін.)», а перелік обмежень у використанні земель територій та об'єктів природно-заповідного фонду доповнено 18 позиціями. Крім цього, до переліку відомостей, обмін якими здійснюється в процесі інформаційної взаємодії між кадастрами та інформаційними системами, додано пункт «26. Планово-картографічні та інші матеріали щодо розташування і режиму територій та об'єктів природно-заповідного фонду, їх охоронних зон, територій, зарезервованих з метою наступного заповідання, територій і об'єктів екомережі та Смарагдової мережі». Тобто у Державному земельному кадастрі відображають практично всі види природоохоронних територій, а на публічній кадастровій карті – відомості про функціональне зонування об'єктів ПЗФ та їх охоронні зони.

За даними обліку земель, станом на 01.01.2021 природно-заповідний фонд України має у своєму складі 8633 території та об'єкти на площі 4105522,247 га. Показник заповідності становить 6,8 %. Більше половини (62,7 %) площі земель ПЗФ України займають території та об'єкти загальнодержавного значення. Серед них 19 природних і 5 біосферних заповідників, 53 національні природні парки, 328 заказників, 136 пам'яток природи,

18 ботанічних садів, 20 дендрологічних та 7 зоологічних парків, 90 парків-пам'яток садово-паркового мистецтва. Загальна площа територій природно-заповідного фонду загальнодержавного значення становить 2977006,19 га, місцевого – 1910517,58 га [5].

Таким чином, пріоритетність розвитку природоохоронної діяльності та охорони біорізноманіття визнані на міжнародному рівні. Велика кількість існуючих територій та об'єктів ПЗФ, відомості про які належать до категорії геопросторових даних, необхідність збільшення площі національної екомережі за рахунок створення нових територій та об'єктів ПЗФ [6] свідчать про актуальність удосконалення систем кадастру територій та об'єктів ПЗФ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розв'язанню питань використання геоінформаційних систем (ГІС) для територій і об'єктів природно-заповідного фонду присвячено праці багатьох вітчизняних та закордонних вчених.

Albert K. W. Yeung, G. Hall [7] визначали, що обробка та аналіз просторових даних стають дедалі більш залежними від використання систем управління базами даних (СУБД). Такий підхід до обробки просторових даних полегшує економічно ефективно управління даними за допомогою можливостей СУБД, а саме системи безпеки, цілісність бази даних, резервне копіювання та відновлення, реплікація даних тощо.

Практика розроблення кадастрових систем у розвинених країнах показує, що вони мають створюватися як геоінформаційні системи з модельно-керованою архітектурою, що інтегруються в інфраструктуру геопросторових даних. Для ефективного застосування ГІС-технології у системах моніторингу важливо повноцінно використовувати насамперед модельний потенціал ГІС на основі баз геопросторових даних у середовищі універсальних об'єктно-реляційних СУБД як у процесі

формулювання теоретичних засад геоінформаційного моніторингу, так і в практиці його реалізації [8].

При створенні систем ГІС-моніторингу в базі географічних знань визначають та формально описують технологічні ланцюжки оброблення даних з використанням базових та спеціальних методів геопросторового аналізу і геообчислень, що постачаються в складі інструментальних ГІС та просторових розширень універсальних об'єктно-реляційних СУБД [9–11].

Аналіз існуючих теоретичних підходів щодо визначення моніторингу земель об'єктів природно-заповідного фонду, який виконали Р.С. В'яткін і К.І. Вяткін [12], показав відсутність єдиних теоретичних положень у цій сфері.

Досвід застосування ГІС для забезпечення проектування, створення та функціонування природоохоронних територій України і Росії вивчали В. А. Пересадько, О. І. Сінна, К. В. Вяткін, О. В. Бодня [13]. Вони виділили три групи поглядів на сутність геоінформаційного забезпечення з точки зору виконання функцій природоохоронних територій як складових природно-заповідного фонду та запропонувало проект структури ГІС-забезпечення для НПП «Дворічанський».

М. В. Харачко [14] розкриваючи основні положення застосування ГІС в управлінні природно-заповідними територіями, відзначив, що ці технології дають змогу на якісно новому рівні забезпечити інформацією всі служби, пов'язані з управлінням природно-заповідними територіями і підвищують рівень обґрунтованості управлінських рішень.

Проведені раніше дослідження [15] свідчать, що системи геоінформаційного моніторингу земель ПЗФ, як елемент інфраструктури геопросторових даних, необхідно створювати з дотриманням чинних нормативно-правових актів. Такі

системи мають містити стандартні й тематичні (вузькопрофільні) набори даних.

У статті [16] А. І. Волков і О. В. Попик запропонували підхід до формування банку даних функціонального зонування об'єктів ПЗФ, який дає змогу отримати комплексне уявлення про стан території на основі просторового аналізу сукупності досить різноманітних характеристик та може бути використаний як елемент системи підтримки прийняття рішень щодо оптимізації використання територій, зокрема які належать до природно заповідного фонду України.

Для підвищення ефективності обробки та візуалізації результатів моніторингу флори та фауни природного заповідника «Розточчя» С. Стрямець і Г. Стрямець [17] сформували бази даних фенологічного моніторингу та інвентаризації ентомофауни. За результатами інвентаризації та моніторингових досліджень А. Бунь, С. Сивній, О. Савчин, О. Стрямець [18] розробили ГІС природного заповідника «Розточчя». До баз даних ГІС була включена інформація про квартално-видільну сітку, породний склад насаджень, постійні пробні площі з таксаційними характеристиками, моніторингові маршрути і пункти та ін.

О. Є. Янчук [19] запропонував концепцію геоінформаційного забезпечення обліку червонокнижних і рідкісних видів рослин на території природного заповідника «Рівненський». Пілотний проєкт представленої концепції геоінформаційної системи реалізовано на ділянці Білоозерського природного масиву заповідника (раніше Білоозерський заказник).

Автори А. М. Крижановський, Н. О. Осадчук [20] запропонували власну концепцію реалізації геоінформаційної системи природно-заповідного фонду Вінницької області.

У статті [21] В. І. Зацерковний, С. В. Кривоберець, В. В. Сергієнко, Ю. С. Сімакін розглянули підходи використання ГІС-технологій для створення

розподіленої бази даних ГІС ПЗФ Чернігівської області. Вони розробили базу даних об'єктів природно-заповідного фонду Чернігівської області.

Проведений огляд публікацій щодо використання ГІС для територій і об'єктів природно-заповідного фонду свідчить, що застосування ГІС для територій та об'єктів ПЗФ здійснюється у двох основних напрямках: перший – структура, завдання та підходи до здійснення геоінформаційного моніторингу, другий – розроблення ГІС для конкретних територій та об'єктів.

З розвитком геоінформаційних технологій і застосуванням їх у різних галузях економіки відбувається накопичення геопросторових даних, а це потребує надійного зберігання, обробки, подання інформації. Саме для розв'язання цих завдань і створюються кадастрові системи. Однак аналіз опублікованих робіт показує, що проблемам створення ГІС кадастру територій та об'єктів ПЗФ дослідники приділяють недостатньо уваги.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою досліджень є створення концептуальної моделі бази тематичних геопросторових даних для первинного обліку кадастрових відомостей територій та об'єктів природно-заповідного фонду на прикладі НПП «Нижньосульський». Для досягнення мети було розв'язано такі завдання: аналіз використання території НПП «Нижньосульський», аналіз кадастру ПЗФ як об'єкта інформатизації, розроблення концептуальної моделі тематичних даних.

**Основна частина дослідження.** Розробленню концептуальної моделі даних передуює аналіз об'єкта інформатизації. Як об'єкт дослідження було обрано національний природний парк «Нижньосульський», створений відповідно до Указу Президента України «Про створення національного природного парку «Нижньосульський» від 10 лютого 2010 року №155/2010. Національний природний парк (НПП) створено з метою збереження цінних природних та історико-

культурних комплексів і об'єктів Середнього Придніпров'я на території Глобинського, Оржицького та Семенівського районів Полтавської області та Чорнобаївського району Черкаської області.

Загальна площа території НПП становить 18635,11 га земель (з них 2187,30 га, які надаються НПП в постійне користування, та 16447,81 га земель, які включаються до його складу без вилучення у землекористувачів).

Розподіл території парку за угіддями такий: сільськогосподарські угіддя – 2430,35 га (13,0 %), чагарникова рослинність природного походження – 1583,56 га (8,53 %), забудовані землі – 3,20 га (0,02 %), землі без рослинного покриву або з незначним покривом – 44,18 га (0,24 %), болота – 2962,28 га (15,9 %), води – 11611,54 га (62,31 %).

Розподіл земель у межах НПП за землевласниками і землекористувачами наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Розподіл земель у межах НПП «Нижньосульський» за землевласниками і землекористувачами

№ п/п	Власники землі, землекористувачі та землі державної власності, не наданої у власність або користування	Площа	
		га	%
1	Громадяни, яким надані землі у власність і користування	371,00	1,98
2	Установи природоохоронного призначення (землі, що надаються в постійне користування НПП)	2187,30	11,73
3	Лісогосподарські підприємства	194	1,04
4	Водогосподарські підприємства	9,27	0,05
5	Землі запасу та землі, що не надані у власність або постійне користування	15873,54	85,20
Усього земель у межах НПП		18635,11	100

Раритетне біорізноманіття НПП становлять рідкісні рослини (Червона книга України), а також рідкісні рослинні угруповання (Зелена книга України). Сьогодні раритетна фракція флори НПП «Нижньосульський» нараховує 13 видів судинних рослин, у тому числі 10 видів занесених до Червоної книги України, 1 – до Червоного списку МСОП, 2 – до Європейського Червоного списку, 4 – до Додатка I Бернської конвенції.

До Зеленої книги України занесено 9 виявлених у НПП формацій:

– угруповання формації глечиків жовтих трапляються зрідка в північній частині ділянками невеликої площі (між селами Тарасівка і Старий Калкаїв, біля села Старий Мохнач, урочище «Драчки», острів Липняги, перед селом Горошине в руслі річки Борис, село Мирони);

– угруповання формації латаття білого трапляються невеликими ділянками у північній частині водосховища (острів Високий, між островами Чубарове, Куличиний-1, річка Борець у селі Горошине, затока в бік села Горошине);

– угруповання формації сальвінії плаваючої фрагментарно трапляються на всій акваторії НПП (між островами Чубарове і Високий, урочище «Березове» (стариці), між селами Тарасівка і Старий Калкаїв, між селами Старий Калкаїв і Гаївка та Старий Мохнач, урочище «Драчки» і острів Липняги (квартал 13), за урочищем «Драчки» (острів на Сулі), за селом Мирони);

– угруповання формації куширу донського трапляється дуже рідко (Сульська затока біля села Велика Бурімка);

– угруповання формації куширу напівзануреного трапляється дуже рідко (Сульська затока біля села Велика Бурімка);

– угруповання формації ковили волосистої фрагментарно на степових схилах (околиці села Ляцівка «Городище Бурти» та «Бородачевий степ», околиці села Велика Бурімка «Собачий хутір»);

– угруповання ковили Лесінга фрагментарно на степових схилах (околиці села Ляцівка «Городище Бурти» та «Бородачевий степ», околиці села Велика Бурімка).

На рис. 1 показане функціональне зонування НПП «Нижньосульський». Відповідно до Закону України «Про природно-заповідний фонд України» на території НПП, з урахуванням природоохоронної, оздоровчої, наукової, рекреаційної, історико-культурної та інших цінностей природних комплексів та об'єктів, їх особливостей встановлюється диференційований режим щодо їх охорони, відтворення та використання і виділяються такі функціональні зони: заповідна; регульованої рекреації; стаціонарної рекреації; господарська.

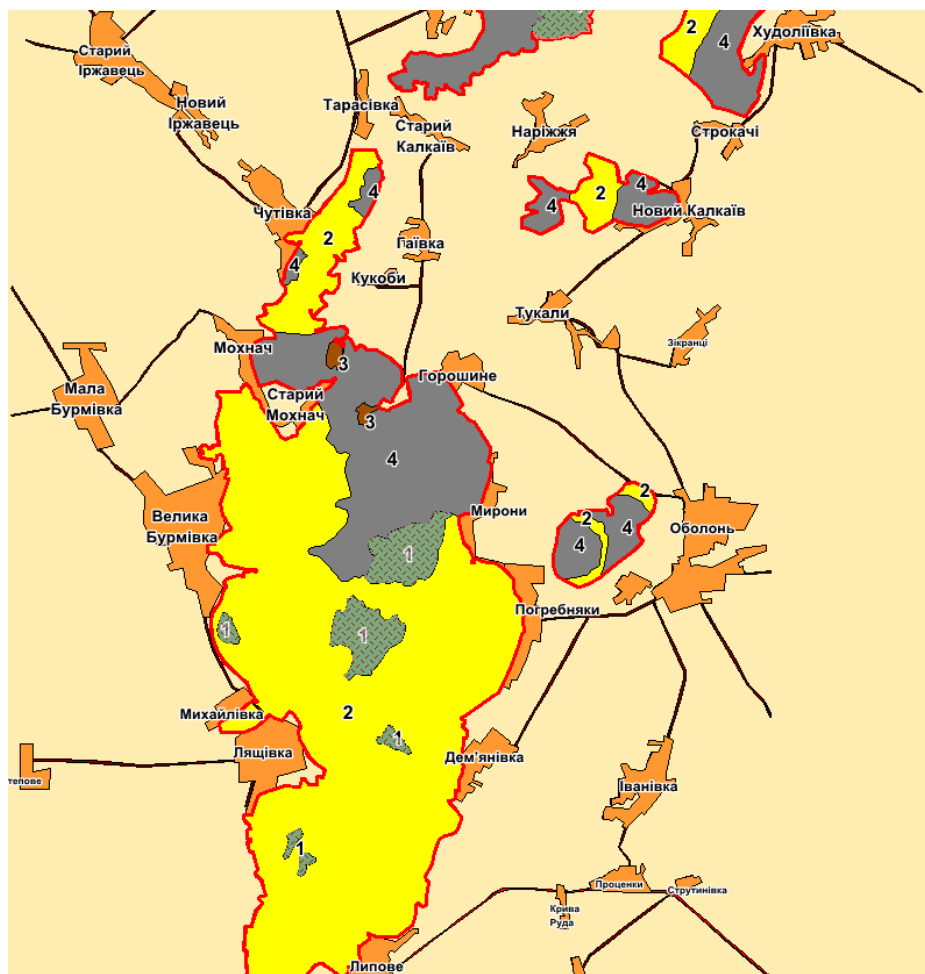


Рис. 1. Функціональне зонування НПП «Нижньосульський»:

1 – заповідна зона, 2 – зона регульованої рекреації, 3 – зона стаціонарної рекреації,  
4 – господарська зона

Призначення та основні функції заповідної зони – це збереження в

незайманому стані всього різноманіття видів, природних комплексів та екосистем.

Особливо цінними з цього погляду є ділянки, на яких не позначився господарський вплив. До заповідної зони, як правило, включають території, які охоронялися раніше (існуючі території та об'єкти ПЗФ), мало трансформовані ділянки з корінними природними комплексами, рідкісними видами та угрупованнями, що мають важливе наукове та природоохоронне значення. Заповідна зона НПП «Нижньосульський» займає площу 1473,3 га (7,9 % від загальної площі).

Основним призначенням зони регульованої рекреації є забезпечення короткострокового відпочинку та оздоровлення населення, огляд особливо мальовничих і пам'ятних місць зони. У цій зоні дозволяється влаштування та відповідне обладнання туристських маршрутів і екологічних стежок. Зона регульованої рекреації НПП «Нижньосульський» займає площу 11976,01 га, що становить 64,2 % від загальної площі.

Основна функція зони стаціонарної рекреації – це максимальне забезпечення потреб відвідувачів при мінімальному порушенні структури природних і господарських комплексів. Ця зона виділяється в місцях найбільш сприятливих для відпочинку. Зона стаціонарної рекреації НПП займає загальну площу 8,5 га, що становить 0,1 % від загальної площі.

Господарська зона визначається з метою здійснення господарської діяльності, спрямованої на виконання покладених завдань, упровадження збалансованого управління природними ресурсами на територіях інших землекористувачів. Господарська зона НПП «Нижньосульський» займає площу 5177,3 га, що становить 27,8 % від загальної площі.

Ураховуючи вимоги чинних нормативно-правових актів, моделювання

ГІС кадастру ПЗФ доцільно проводити передбачаючи можливість інтегрування її в національну інфраструктуру геопросторових даних.

Документація кадастру ПЗФ включає чотири форми: «Картка первинного обліку територій та об'єктів природно-заповідного фонду України», «Державний кадастр територій та об'єктів природно-заповідного фонду України», «Карта-схема розташування територій та об'єктів ПЗФ України», «Зміни у складі природно-заповідного фонду України». «Картка первинного обліку територій та об'єктів природно-заповідного фонду України» заповнюється за результатами обліку, обстеження та інвентаризації природних комплексів, оцінки стану об'єктів ПЗФ. Інші форми створюють шляхом узагальнення даних окремих «Карток первинного обліку» при формуванні кадастру ПЗФ адміністративно-територіальних одиниць та держави в цілому.

За результатами аналізу основних положень ведення кадастру ПЗФ та ресурсів НПП «Нижньосульський» як об'єкта інформатизації була складена концептуальна схема бази тематичних геопросторових даних (рис. 2). Схема подана з використанням нотацій уніфікованої мови моделювання UML.

До набору базових просторових даних такої системи було включено відомості про системи координат і висот, адміністративно-територіальні одиниці, територіальні громади, об'єкти гідрографії та гідротехнічні споруди, населені пункти, будівлі та споруди, автомобільні дороги, залізниці, інженерні комунікації, ґрунти, земельні ділянки, географічні назви, рельєф, ортофотоплани. До набору цих даних можуть бути включені інші відомості залежно від специфіки конкретного регіону.

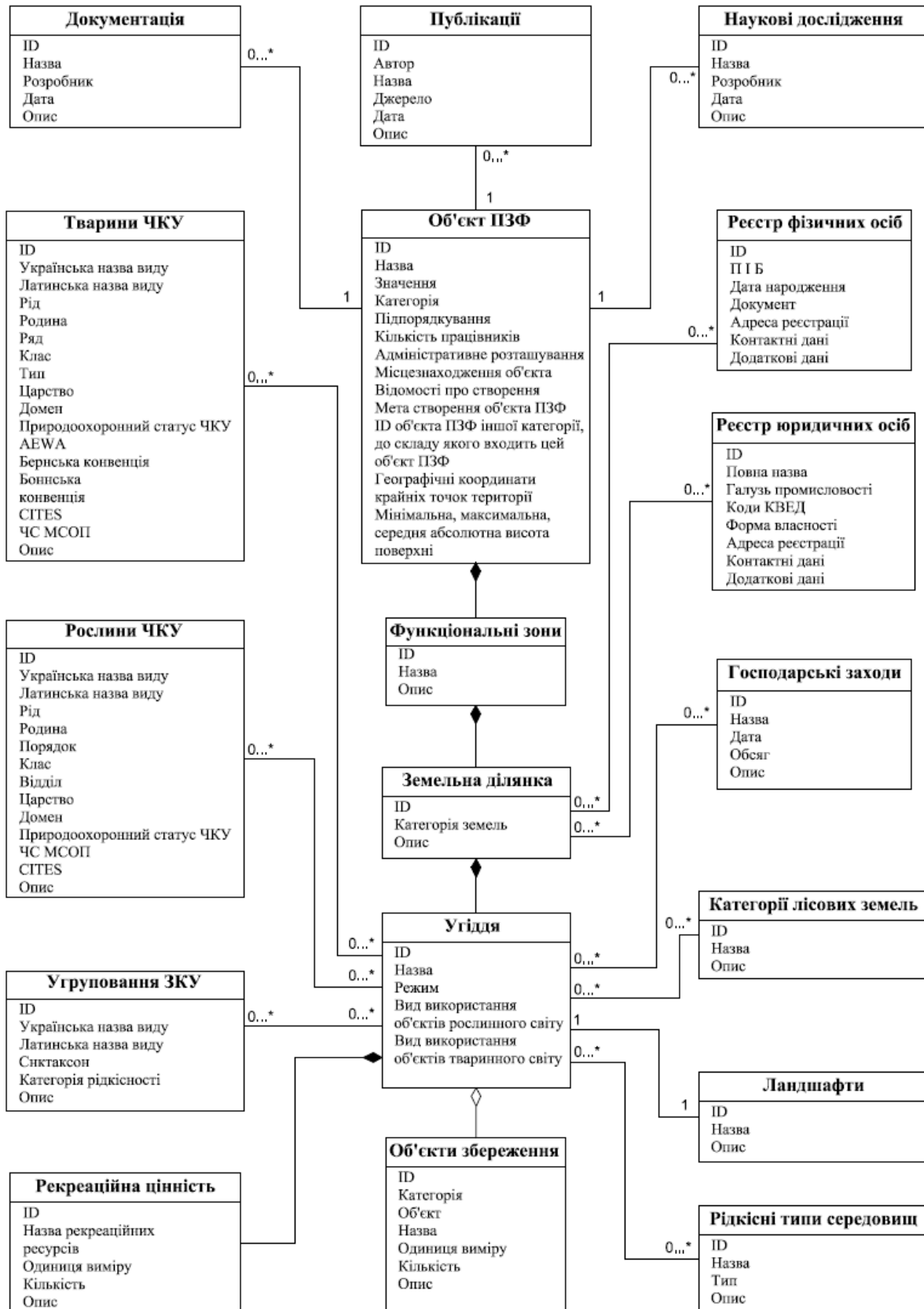


Рис. 2. UML-діаграма концептуальної моделі тематичних даних

До набору тематичних даних можна віднести відомості, що містить Державний кадастр територій та об'єктів ПЗФ: правовий статус, належність, режим, географічне положення, кількісні і якісні характеристики цих територій та об'єктів, їх природоохоронну, наукову, освітню, виховну, рекреаційну й іншу цінність. Повний набір тематичних даних сформований на основі карток первинного обліку та завдань, які розв'язують при управлінні об'єктами ПЗФ. До нього увійшли відомості про об'єкти ПЗФ, їх функціональне зонування, земельні ділянки та угіддя, власників та користувачів земельних ділянок, проведені господарські заходи, ландшафти, рідкісні типи середовищ, об'єкти збереження, рекреаційну цінність, а також рідкісні види рослин і тварин.

Запропонована модель даних є проєктом і може бути вдосконалена шляхом

приспосаування до місцевих або регіональних вимог.

**Висновки.** За результатами виконаних досліджень було створено UML-діаграму концептуальної моделі бази тематичних геопросторових даних ГІС первинного обліку кадастру природно-заповідного фонду. Системи, створені на основі запропонованої моделі, можуть бути використані адміністраціями територій та об'єктів ПЗФ для підвищення рівня автоматизації управління, інвентаризації ресурсів, організації наукових досліджень та ін. Упровадження ГІС у системи управління просторово-розподіленими ресурсами забезпечує обґрунтованість управлінських рішень. Запропонована концептуальна модель може бути доповнена і вдосконалена з урахуванням місцевих або регіональних умов.

#### *Список використаних джерел*

1. Про природно-заповідний фонд України: Закон України від 16 червня 2002 р. № 2456–XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12> (дата звернення 14.08.2021).
2. Про національну інфраструктуру геопросторових даних : Закон України від 13 квітня 2020 р. № 554–IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20> (дата звернення: 21.08.2021).
3. Про затвердження Інструкції про зміст та складання документації державного кадастру територій та об'єктів природно-заповідного фонду України: Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища від 16.02.2005 № 67. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0298-05> (дата звернення 21.08.2021).
4. Порядок ведення Державного земельного кадастру : Постанова Кабінету міністрів України від 17 жовтня 2012 р. № 1051. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012> (дата звернення 14.08.2021).
5. Інформаційно-аналітичні матеріали Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України з питання «Аналіз площ природно-заповідного фонду України в розрізі адміністративно-територіальних одиниць за 2020 рік». URL: <https://mepr.gov.ua/timeline/Zviti.html> (дата звернення: 21.08.2021).
6. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28.02.2019 № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення: 21.08.2021).
7. Albert K.W. Yeung, G. Brent Hall. Spatial database system: design, implementation and project management. *The GeoJournal Library*. 2007. Vol. 87. Springer. 553 p.



8. Лященко А., Патракеєв І. Онтологія та особливості компонентів геоінформаційного моніторингу за технологією баз геопросторових даних. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2015. Вип. I (29). С. 174–177.
9. Skidmore A. *Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing*. London and New York: Taylor & Francis, 2002. 275 p.
10. Frank A. *Ontology for GIS* URL: [ftp://ftp.geoinfo.tuwien.ac.at/frank/ontology\\_book\\_all\\_pieces\\_v5\\_a.pdf](ftp://ftp.geoinfo.tuwien.ac.at/frank/ontology_book_all_pieces_v5_a.pdf), 2005. 7. Fortin M.-J. *Spatial Analysis. A Guide for Ecologist* / Marie-Josée Fortin, Mark R. T. Dale. *Cambridge University Press*, New York. 2005. 365 p.
11. Rodriguez-Bachiller A., Glasson J. *Expert Systems and Geographical Information Systems for Impact Assessment*. *Oxford Brookes University*, UK – London and New York: Taylor & Francis, 2004. 409 p.
12. В'яткін Р. С., Вяткін К. І. Теоретичні підходи щодо визначення моніторингу використання земель об'єктів природно-заповідного фонду. *Комунальне господарство міст*. 2020. Т. 4, вип. 157. С. 72–78.
13. Геоінформаційне забезпечення природоохоронних територій / В. А. Пересадько, О. І. Сінна, К. В. Вяткін, О. В. Бодня. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2012. Вип. 15. С. 74–77.
14. Харачко М. В. Застосування геоінформаційних систем в управлінні природно-заповідними територіями. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Вип. 24. С. 115–120.
15. Гальченко Н. П., Козарь В. І. Структура бази даних для забезпечення геоінформаційного моніторингу земель природно-заповідного фонду. *Екологічна безпека*. 2019. Вип. 2/2019 (27). С. 32–37.
16. Волков А. І., Попик О. В. Можливості застосування геоінформаційних систем для функціонального зонування об'єктів природно-заповідного фонду (на прикладі НПП «Гомільшанські ліси»). *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Сер. Екологія*. 2015. Вип. 12, № 1147. С. 33–40.
17. Стрямець С., Стрямець Г. Бази даних для моніторингу біорізноманіття природного заповідника «Розточчя». *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2009. № 650. С. 200–204.
18. Формування геоінформаційної системи природного заповідника «Розточчя» / А. Бунь, С. Сивній, О. Савчин, О. Стрямець. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2011. № 694. С. 127–131.
19. Янчук О. Є. Геоінформаційне забезпечення обліку рідкісних рослин (на прикладі Рівненського природного заповідника). *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер. Технічні науки*. 2014. Вип. 1(65). С. 324–331.
20. Крижановський А.М., Осадчук Н.О. Розробка геоінформаційної системи природно-заповідного фонду Вінницької області. *Науково-технічна конференція комп'ютерних систем і автоматики. Секція системного аналізу та комп'ютерного моніторингу*. 2017. С. 5–10.
21. ГІС природно-заповідного фонду Чернігівської області / В. І. Зацерковний, С. В. Кривоберець, В. В. Сергієнко, Ю. С. Сімакін. *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер. География*. 2010. Том 23 (62), № 2. С. 92–104.

---

Гальченко Надія Павлівна, канд. біол. наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру  
Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2659-177X>. Тел.: +38 (067) 270-42-90. E-mail: [nadingal9@gmail.com](mailto:nadingal9@gmail.com)

Козарь Валентин Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру  
Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4084-3507>. E-mail: [v.kozar@meta.ua](mailto:v.kozar@meta.ua)

---

Міхно Павло Борисович, канд. техн. наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру  
Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8045-6478>. E-mail: [mikhno1982@gmail.com](mailto:mikhno1982@gmail.com)

Клюка Олена Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру  
Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9250-1157>. E-mail: [klyukalena@gmail.com](mailto:klyukalena@gmail.com)

Halchenko Nadiia Pavlivna, PhD (Biol.), Associate Professor of Department of Geodesy, Land Management and  
Cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2659-177X>. Тел.: +38 (067) 270-42-90. E-mail: [nadingal9@gmail.com](mailto:nadingal9@gmail.com)

Kozar Valentyn Ivanovich, PhD (Tech.), Associate Professor of Department of Geodesy, Land Management and  
Cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4084-3507>. E-mail: [v.kozar@meta.ua](mailto:v.kozar@meta.ua)

Mikhno Pavlo Borisovich, PhD (Tech.), Associate Professor of Department of Geodesy, Land Management and  
Cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8045-6478>. E-mail: [mikhno1982@gmail.com](mailto:mikhno1982@gmail.com)

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

Статтю прийнято 20.12.2021 р.

**ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)**

---

УДК 621.314

**СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ВИХІДНОЇ НАПРУГИ АКТИВНОГО  
ЧОТИРИКВАДРАНТНОГО ВИПРЯМЛЯЧА**

Канд. техн. наук В. П. Нерубацький, канд. техн. наук О. А. Плахтій, аспіранти  
А. В. Машура, Д. А. Гордієнко, старший викладач В. В. Варв'янська

**SYNTHESIS OF THE OUTPUT VOLTAGE REGULATOR OF THE ACTIVE  
FOUR-QUADRANT RECTIFIER**

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, Postgraduate student  
A. V. Mashura, Postgraduate student D. A. Hordiienko, Senior lecturer V. V. Varvianska

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256643>

---

***Анотація.** Проведено аналіз відомих систем керування активного чотириквADRANTНОГО випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією, що застосовується на електричному рухомому складі залізничного транспорту, і методів визначення модального та симетричного оптимуму. Встановлено необхідність системи автоматичного регулювання для стабілізації вихідної напруги за умови зміни струму. Розроблено систему керування активного трифазного чотириквADRANTНОГО випрямляча на базі широтно-імпульсної модуляції. Визначено статичну регульовальну характеристику вихідної напруги активного випрямляча у функції величини струму навантаження та значення регульовального коефіцієнта. Визначено амплітудно-частотну характеристику каналу керування вихідної напруги активного випрямляча, що отримано шляхом додавання до керуючого сигналу додаткових частот і вимірювання даних частот у формі вихідної напруги. Визначено динамічну регульовальну характеристику та передавальну функцію активного випрямляча. Проведено моделювання активного випрямляча із системою керування та частотою широтно-імпульсної модуляції 10 кГц у програмному середовищі Matlab / Simulink. Виконано синтез регулятора вихідної напруги активного трифазного чотириквADRANTНОГО випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією на основі модального оптимуму. Отримано осцилограми перехідного процесу вихідної напруги при авторегулюванні.*

***Ключові слова:** активний трифазний чотириквADRANTНИЙ випрямляч, електричний рухомий склад, коефіцієнт потужності, регулятор вихідної напруги, рекуперація, широтно-імпульсна модуляція.*

***Abstract.** The analysis of known control systems of the active four-quadrant rectifier with pulse-width modulation applied on a rolling stock of electric railway transport, and methods of definition of modal and symmetric optimum is carried out. The necessity of the automatic regulation system for stabilization of the output voltage under the condition of current change is established. The control system of the active three-phase four-quadrant rectifier on the basis of pulse-width modulation is developed. The static control characteristic of the output voltage of the active rectifier as a function of the value of the load current and the value of the control factor is determined. It is shown that the*

control characteristic is nonlinear, and the static transmission coefficient of the active rectifier depends on the load current. The amplitude-frequency characteristic of the control channel of the output voltage of the active rectifier is determined, which is obtained by adding additional frequencies to the control signal and measuring these frequencies in the form of the output voltage. The dynamic control characteristic and transfer function of the active rectifier are determined. The simulation of an active rectifier with a control system and a pulse-width modulation frequency of 10 kHz in the Matlab / Simulink software environment was performed. The synthesis of the output voltage regulator of an active three-phase four-quadrant rectifier with pulse-width modulation is performed, which is made on the basis of the modal optimum. The oscillograms of the transient process of the output voltage during autoregulation are obtained. Given the fact that the static transmission factor of the control system of the active rectifier depends on the load current, to obtain the uniqueness of the transient process when regulating the output voltage, it is necessary to create an adaptive regulator for the output current of the active rectifier.

**Keywords:** active three-phase four-quadrant rectifier, electric rolling stock, power factor, output voltage regulator, recuperation, pulse-width modulation.

**Вступ.** Активні чотириквADRANTні випрямлячі електричного рухомого складу залізничного транспорту мають низку переваг порівняно з класичними діодними і тиристорними випрямлячами:

– можливість активного формування синусоїдальної форми вхідного струму [1, 2];

– можливість формування коефіцієнта потужності, близького до одиниці (більше 0,99) [3, 4];

– можливість компенсації реактивної потужності та вищих гармонік струмів у мережі [5, 6];

– можливість регулювання та стабілізації вихідної напруги випрямляча [7];

– можливість двонаправленої передачі енергії назад з ланки постійного струму в трифазну мережу з підтримкою синусоїдального струму [8, 9].

На рис. 1 наведено силову схему активного трифазного чотириквADRANTного випрямляча.

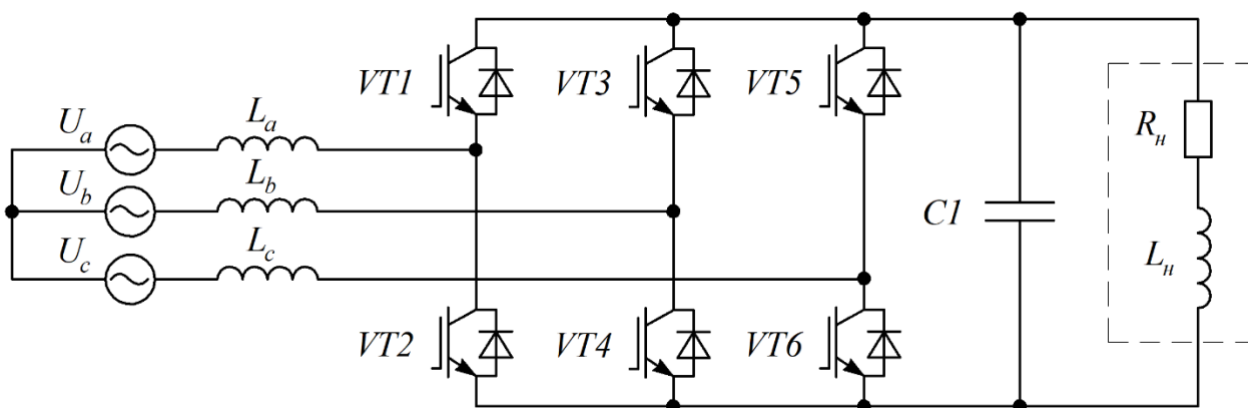


Рис. 1. Силова схема активного трифазного чотириквADRANTного випрямляча

Для опису балансу напруг у перетворювачі можна застосувати систему рівнянь:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_c \\ u_c \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Диференціальне рівняння, що описує залежність вихідної напруги від величини фазних струмів з урахуванням миттєвих значень комутаційних функцій, має вигляд:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a \cdot i_{ca} + S_b \cdot i_{cb} + S_c \cdot i_{cc} - i_{dc}. \quad (2)$$

Однак недоліком цього перетворювача є можливість зриву режиму корекції коефіцієнта потужності при зниженні вихідної напруги нижче амплітудного значення вхідної лінійної напруги, а також складність побудови регулятора вихідної напруги. Побудова системи автоматичного регулювання є важливим складником будь-якої перетворювальної системи [10, 11]. Для регулювання та стабілізації вихідної напруги активного випрямляча необхідна реалізація функції автоматичного регулювання вихідної напруги [12, 13].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [14, 15] наведено дослідження систем керування активного чотириквadrантного випрямляча, побудованих на принципі передбачуваного керування. Передбачуване керування дає змогу отримати оптимальний стан комутації, який можна легко вибрати без побудови віртуальних ортогональних величин порівняно з існуючими дослідженнями однофазних перетворювачів. Крім того, запропонований спосіб реалізує схеми перемикання з фіксованою частотою перемикання шляхом відповідного поділу стану нульової напруги і стану ненульової напруги без використання модулів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Запропонований метод має переваги простого оптимального вибору напруги і не використовує блок ШІМ порівняно з існуючими методами.

Ефективність запропонованого методу порівнювалася з традиційним методом прогнозного керування струмом зі змінною частотою перемикання та методом ШІМ на основі PI-контролера [16, 17]. Запропонований метод може генерувати шаблони комутації з постійною частотою перемикання, подібно до методу ШІМ на основі PI-контролера під час стаціонарного режиму, що полегшує вирішення проблем проектування фільтрів. Крім того, запропонований метод дає змогу підтримувати швидку динаміку звичайного методу прогнозного регулювання струму, який є швидшим, ніж метод ШІМ на основі PI-контролера. Недоліком цих досліджень є невизначеність, за яким критерієм було обрано саме PI-регулятор, і незрозуміло, яким чином було виконано розрахунок відповідних коефіцієнтів регулятора.

Таким чином, завдання визначення динамічних властивостей, визначення передавальної функції активного випрямляча та синтезу регулятора вихідної напруги є актуальним невирішеним завданням.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є визначення методу синтезу регулятора вихідної напруги активного трифазного чотириквadrантного випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією для електричного рухомого складу залізничного транспорту, що дасть можливість отримання однозначності перехідного процесу при регулюванні та стабілізації вихідної напруги активного випрямляча. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- побудувати статичну регульовальну характеристику вихідної напруги активного випрямляча;
- визначити амплітудно-частотну характеристику каналу керування вихідної напруги активного випрямляча;
- визначити передавальну функцію активного випрямляча;

– визначити динамічну регульовальну характеристику активного випрямляча;

– виконати синтез регулятора вихідної напруги, налаштованого на модальний оптимум.

**Основна частина дослідження.**

Статична регульовальна характеристика вихідної напруги активного трифазного чотириквadrантного випрямляча електричного рухомого складу може бути отримана виходячи з рівняння балансу потужності:

$$3 \cdot U_{вх} \cdot I_{вх} \cdot \eta \cdot \lambda = U_{вих} \cdot I_{вих}, \quad (3)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії активного випрямляча;  $\lambda$  – коефіцієнт потужності;

$U_{вх}$  – середньоквадратичне значення вхідної фазної напруги;  $I_{вх}$  – середньоквадратичне значення вхідного струму;  $U_{вих}$  – середньоквадратичне значення вихідної напруги випрямляча;  $I_{вих}$  – середньоквадратичне значення вихідного струму активного випрямляча.

Для активних трифазних чотириквadrантних перетворювачів характерні два типи систем керування. Перший тип побудовано на основі гістерезисної модуляції, а другий тип – на основі широтно-імпульсної модуляції [18, 19].

На рис. 2 наведено систему керування активного трифазного чотириквadrантного випрямляча на базі широтно-імпульсної модуляції.

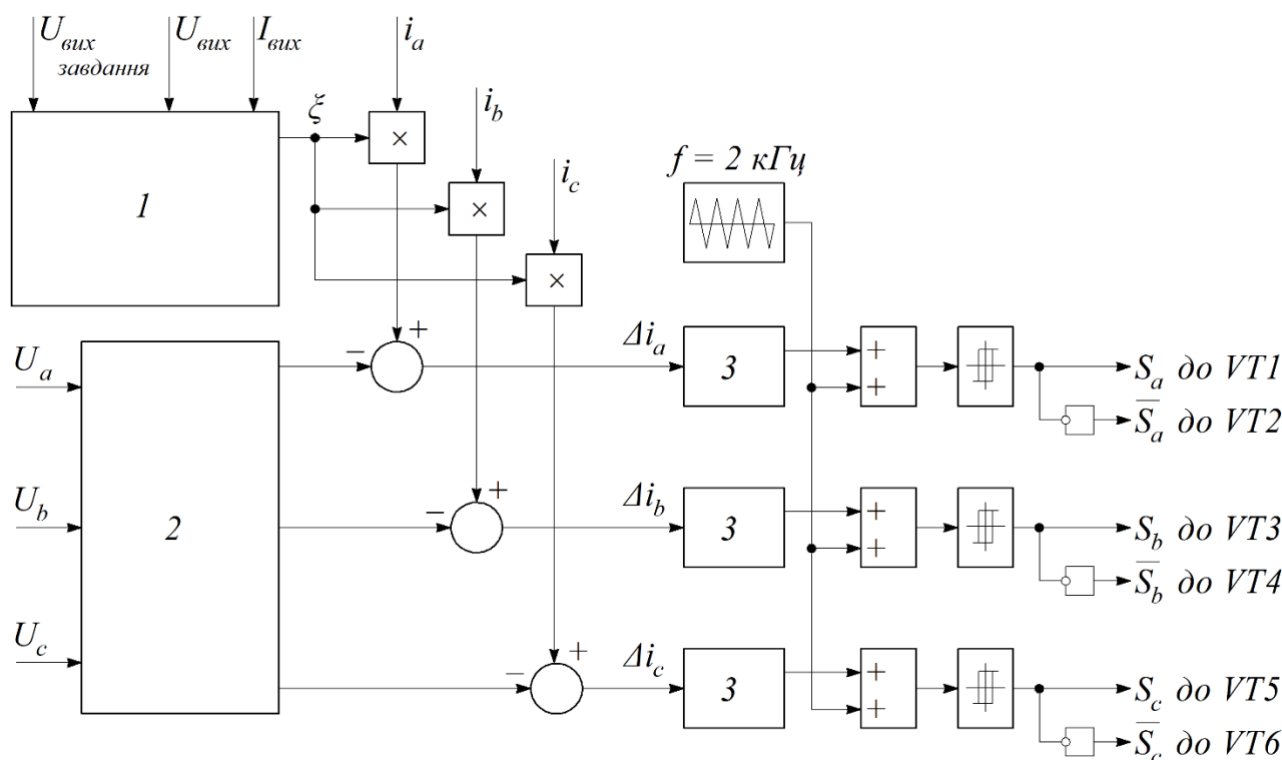


Рис. 2. Система керування активного трифазного чотириквadrантного випрямляча на базі широтно-імпульсної модуляції:

1 – регулятор вихідної напруги; 2 – блок виділення перших гармонік;

3 – фільтр низьких частот

Система керування активного випрямляча активно формує вхідний струм,

який за формою повторює форму вхідної напруги активного випрямляча [20, 21].

Проте амплітуда, необхідна для формування заданої величини вихідної напруги активного випрямляча, задається через регулювальний коефіцієнт, вхідний струм може бути визначено таким виразом [22]:

$$I_{ex} = U_{ex} \cdot \xi, \quad (4)$$

де  $\xi$  – регулювальний коефіцієнт системи керування, що визначає відношення вхідного струму та вхідної напруги активного випрямляча.

Таким чином, значення вихідної напруги активного випрямляча електричного рухомого складу через регулювальний коефіцієнт  $\xi$  може бути визначено за такими виразами:

$$U_{вих} = \frac{U_{ex}^2 \cdot \xi \cdot \eta \cdot \lambda}{I_{вих}}; \quad (5)$$

$$U_{вих} = \sqrt{\frac{U_{ex} \cdot U_{ex} \cdot \xi \cdot \eta \cdot \lambda}{R_n}}. \quad (6)$$

При цьому необхідно зазначити, що режим випрямлення реалізується при додатному значенні регулювального коефіцієнта  $\xi$  при підтриманні коефіцієнта потужності, рівного одиниці  $\lambda = 1$ , а режим рекуперації реалізується при від'ємному значенні  $\xi$ . У зв'язку з тим, що режим корекції коефіцієнта потужності та формування синусоїдального вхідного струму активного випрямляча можливий лише за умови, коли вихідна напруга більша, ніж амплітудне значення вхідної напруги [23, 24],

$$U_{вих} \geq U_{ex} \cdot \sqrt{2}. \quad (7)$$

Статичну регулювальну характеристику вихідної напруги активного випрямляча електричного рухомого складу в режимах випрямлення та рекуперації може бути подано 3D-площинами (рис. 3).

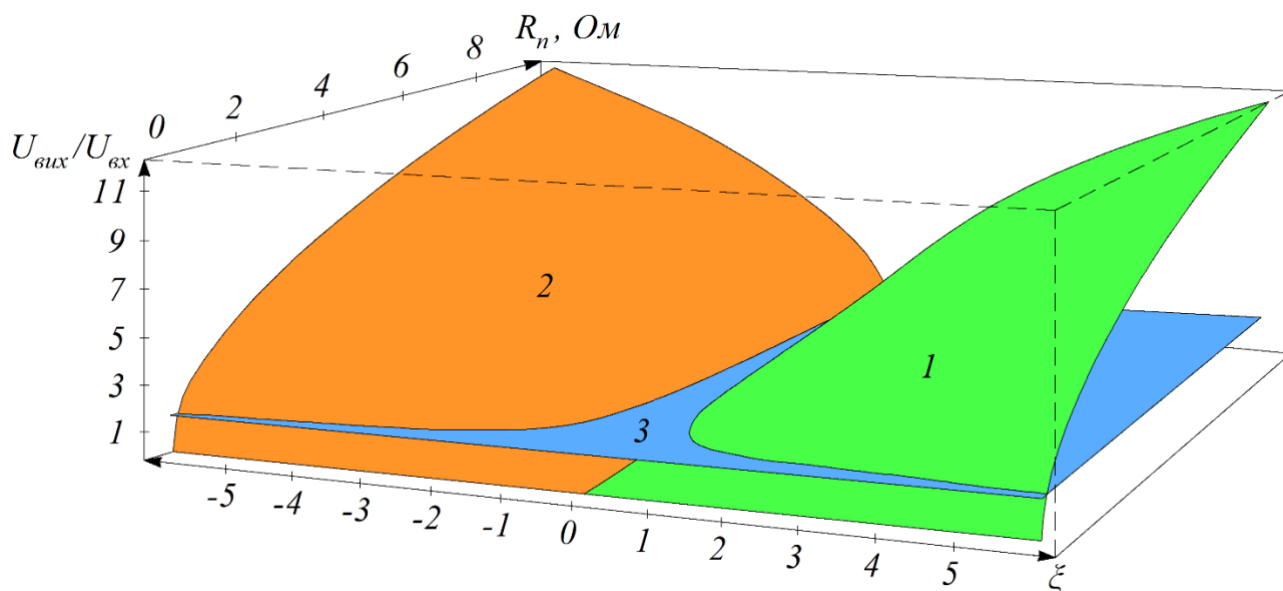


Рис. 3. Статична регулювальна характеристика вихідної напруги активного випрямляча: 1 – у режимі випрямлення; 2 – у режимі рекуперації; 3 – обмеження в регулюванні вихідної напруги

Таким чином, визначено нелінійний характер статичної регулювальної характеристики вихідної напруги активного випрямляча у функції величини струму навантаження і значення регулювального коефіцієнта  $\zeta$ .

Для стабілізації вихідної напруги за умови зміни струму навантаження система автоматичного регулювання є необхідною [25, 26]. Інакше при зміні струму навантаження при тому самому значенні регулювального коефіцієнта  $\zeta$ , величина вихідної напруги буде змінюватися.

Одними з методів синтезу регуляторів є частотні методи, такі як методи визначення модального та симетричного оптимуму [27, 28]. Для синтезу передавальної функції регулятора вихідної напруги за частотними методами необхідним є визначення амплітудно-частотних характеристик об'єкта керування [29, 30].

У даному випадку об'єкт керування є імпульсним, що пов'язано з широтно-імпульсною модуляцією в системі керування.

Амплітудно-частотні характеристики каналу керування вихідної напруги активного випрямляча отримано шляхом додавання сигналу керування  $\zeta$  гармонік з різними частотами (від 1 Гц до 10 кГц) і вимірюванням даної частоти у формі вихідної напруги активного випрямляча.

Обмеження цього методу полягає в тому, що необхідно додавати частоти, які не містяться у спектрі вихідної напруги активного випрямляча.

Даний експеримент проводився на розробленій комп'ютерній моделі активного випрямляча із системою керування із частотою ШІМ 10 кГц (рис. 4) в програмному середовищі Matlab / Simulink версії 2017b.

Параметри імітаційної моделі активного випрямляча наведено в табл. 1.

Результати моделювання, а саме визначення амплітуди доданих сигналів у канал керування у формі вихідної напруги, наведено в табл. 2.

Таблиця 1

Параметри активного трифазного чотириквadrантного випрямляча

Параметр	Значення
Середньоквадратичне значення вхідної напруги, В	100
Індуктивність вхідного дроселя, мГн	2
Опір вхідного дроселя, мОм	1
Ємність вхідного конденсатора, мФ	60
Опір навантаження, Ом	від 1 до 10



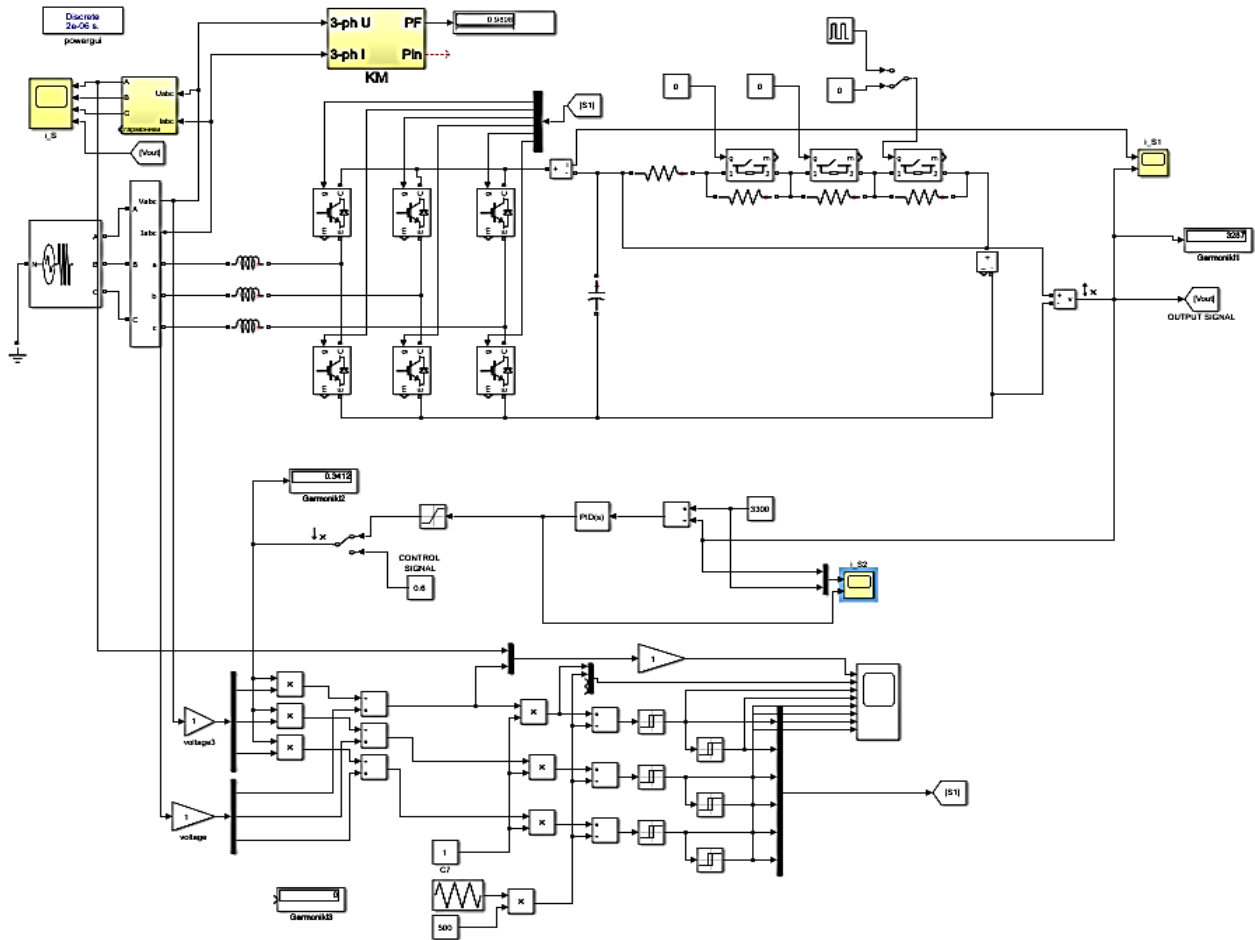


Рис. 4. Matlab-модель активного трифазного чотириквadrантного випрямляча

Таблиця 2

Амплітудно-частотні характеристики каналу керування вихідної напруги активного випрямляча з ПШМ

Частота доданого сигналу, Гц	Амплітуда доданого сигналу у формі вихідної напруги, В	Коефіцієнт передачі, дБ
0,1	47,48	35,23021
1	45,98	34,85138
3	37,64	34,01299
10	17,25	26,73578
40	5,704	15,12359
80	4,238	12,54322
300	2,392	7,575224
600	1,339	2,535612
1200	0,7063	-3,02022
2500	0,3974	-8,01544
5000	0,2016	-13,9102
10000	0,1125	-18,9769
20000	0,07693	-22,2781
40000	0,062	-24,1522

Отриману в ході експерименту логарифмічну амплітудно-частотну характеристику каналу керування вихідної

напруги активного випрямляча наведено на рис. 5.

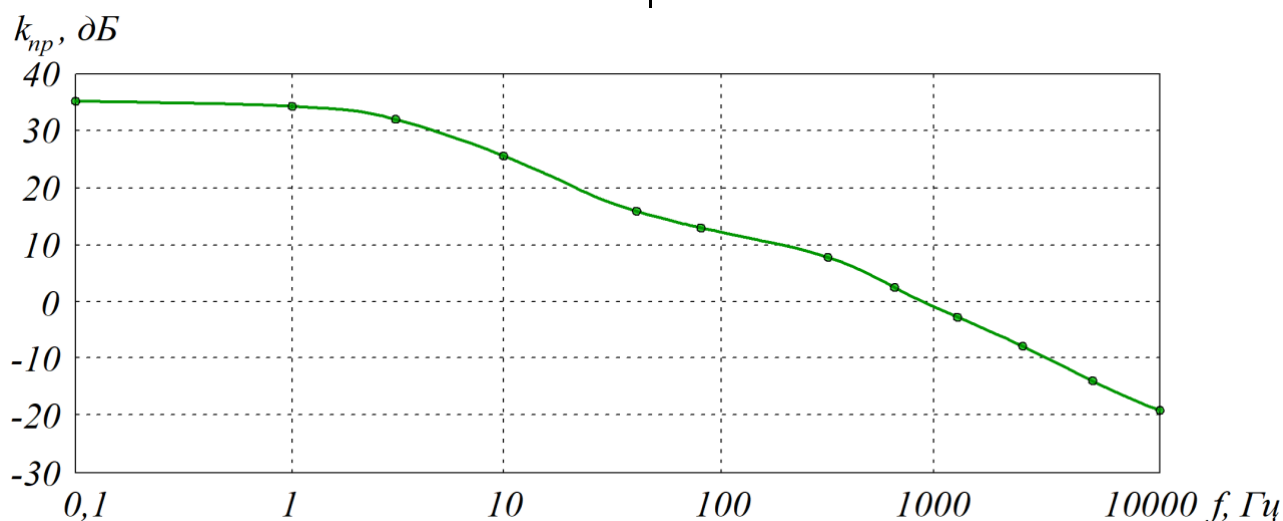


Рис. 5. Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика каналу керування вихідної напруги

Для налаштування системи автоматичного керування на модальний оптимум застосовано структурну схему

одноконтурної системи автоматичного регулювання, що наведено на рис. 6.

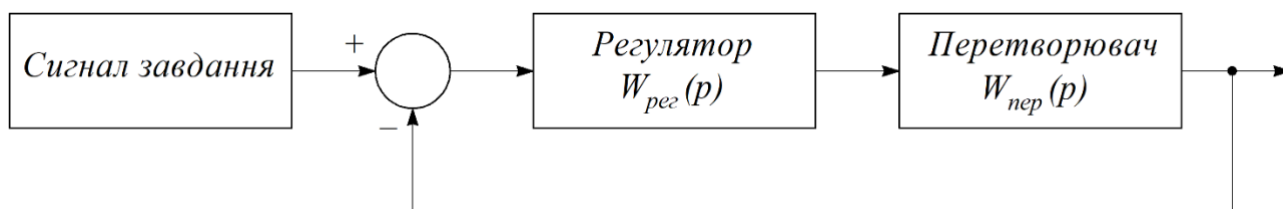


Рис. 6. Структурна схема одноконтурної системи автоматичного регулювання

При налаштуванні системи автоматичного регулювання на модальний оптимум ця система буде мати такі властивості:

- час виходу на установлене значення складає  $4,7 \cdot T_u$  (рис. 7, а);
- величина перерегулювання складає 4,3 % (рис. 7, а);

– характерна форма логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) (рис. 7, б);

– запас стійкості по фазі на частоті зрізу складає 63 градуси (рис. 7, б).

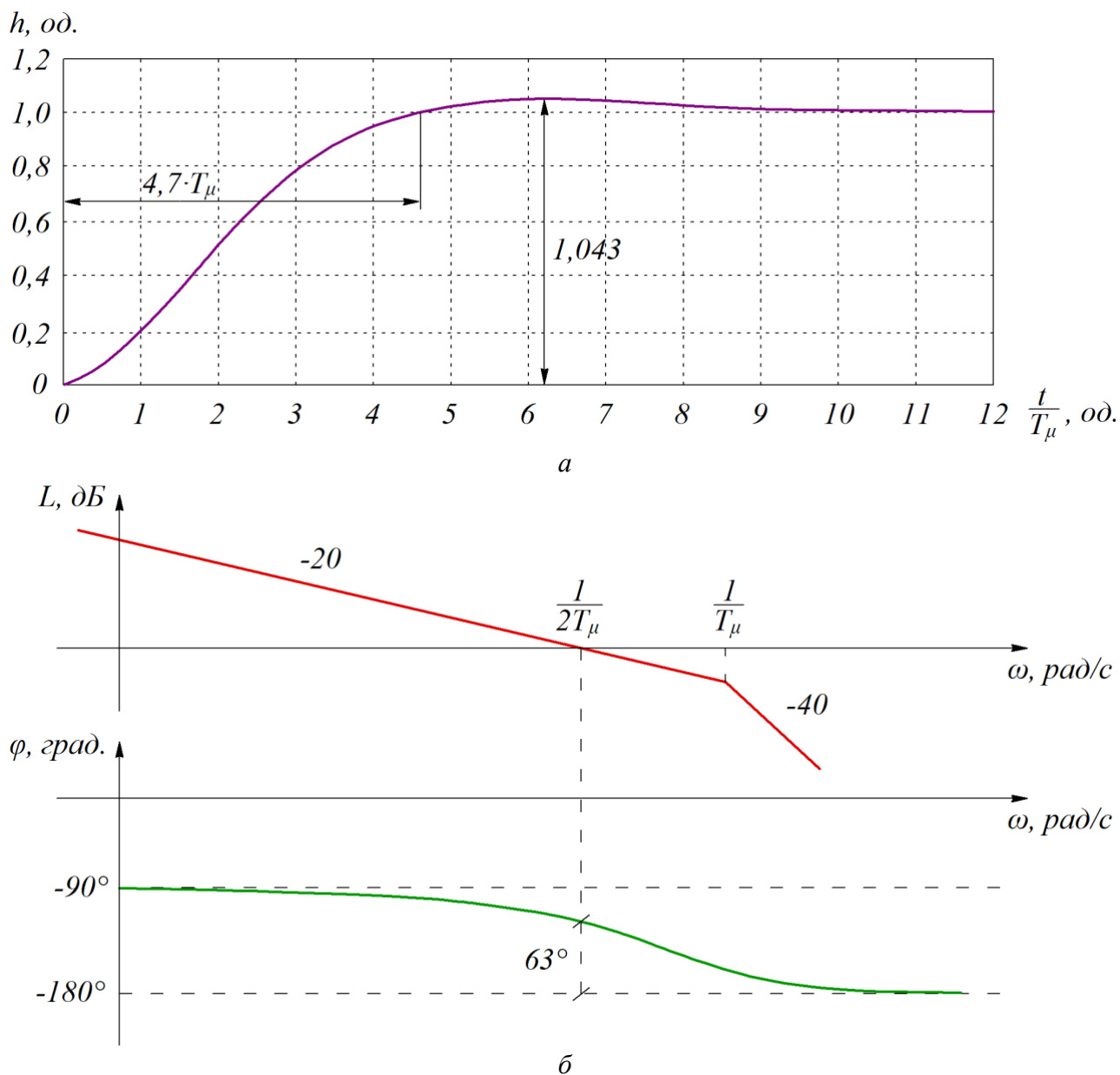


Рис. 7. Властивості системи авторегулювання, налаштованої на модальний оптимум:  
 а – типовий перехідний процес при ступінчастому завданні; б – амплітудно-частотна характеристика замкнутого контуру регулювання (запас системи авторегулювання по фазі)

Для бажаної ЛАЧХ, налаштованої на модальний оптимум, буде характерною передавальна функція:

$$W_p(p) = \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot (T_\mu \cdot p + 1)} \quad (8)$$

Час перехідного процесу замкнутого контуру автоматичного регулювання залежить від обраної частоти зрізу та обраного значення сталої  $T_\mu$ .

Задані значення бажаного часу виходу на усталений режим у  $T_{вих} = 0,2$  с. Тоді значення  $T_\mu$  для бажаної ЛАЧХ складатиме:

$$T_{\mu} = \frac{T_{вих}}{4,7} = \frac{0,2}{4,7} = 0,0425 \text{ с.} \quad (9)$$

Налаштування системи автоматичного регулювання проводиться з допущенням того, що отримана в ході експерименту логарифмічна амплітудно-частотна характеристика апроксимується в аперіодичну функцію першого порядку [31]:

$$W_{np}(p) = \frac{k_{np}}{T_0 \cdot p + 1}, \quad (10)$$

де  $k_{np}$  – статичний коефіцієнт передачі активного перетворювача;  $T_0$  – час зрізу АЧХ перетворювача.

У ході проведеного експерименту відповідно до рис. 5 значення  $k_{np}$  дорівнює 34 дБ (у функції це рази – 50 разів). Відповідно до цього значення за табл. 2 частота зрізу АЧХ перетворювача дорівнює 3 Гц.

Для побудови графіків необхідно використовувати значення не часу, а частоти в одиницях вимірювання – рад/с.

Знаючи значення часу зрізу АЧХ, можна обчислити частоту зрізу за виразом [32]:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0}. \quad (11)$$

Звідси

$$T_0 = \frac{1}{\omega_0}. \quad (12)$$

Частота зрізу АЧХ перетворювача  $\omega_0$  складає 3 Гц, що дорівнює 18,8 рад/с.

$$T_0 = \frac{1}{18,8} = 0,053 \text{ с.}$$

При створенні замкненої системи автоматичного регулювання передавальна функція замкненого контуру має вигляд:

$$W_{np}(p) = \frac{50}{0,053 \cdot p + 1}.$$

Таким чином, отримана передавальна функція регулятора вихідної напруги, налаштованого на модальний оптимум, буде мати вигляд:

$$W_{pez}(p) = \frac{k_m \cdot (T_0 \cdot p + 1)}{(T_{\mu} \cdot p + 1)}, \quad (13)$$

де  $T_{\mu} = 0,042$  с ( $\omega_{\mu} = 24$  рад/с);  $T_{2\mu} = 0,084$  с ( $\omega_{2\mu} = 12$  рад/с);  $k_m = -8$  дБ (при переведенні в рази дорівнює 0,4).

Бажаний час перехідного процесу  $T_m$  відображається при кроці 0,2 секунди.

Постійна часу, пов'язана із частотою зрізу, складає:

$$T_{\mu} = \frac{T_m}{4,7}; \quad (14)$$

$$T_{\mu} = \frac{0,2}{4,7} = 0,042 \text{ с.}$$

Частота зрізу бажаної ВАХ складає:

$$\omega_{zp} = \omega_{2\mu} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}}; \quad (15)$$

$$\omega_{zp} = \omega_{2\mu} = \frac{1}{2 \cdot 0,042} = 12 \text{ рад/с.}$$

Передавальна функція зворотного зв'язку буде мати вигляд:

$$W_{зам}(p) = \frac{W_{pez}(p) \cdot W_{np}(p)}{1 + W_{pez}(p) \cdot W_{np}(p)}; \quad (16)$$

$$W_{зам}(p) = \frac{\frac{k_m \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}{T_1 \cdot p \cdot (T_{2\mu} \cdot p + 1)} \cdot \frac{k_{np}}{T_0 \cdot p + 1}}{1 + \frac{k_m \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}{T_1 \cdot p \cdot (T_{2\mu} \cdot p + 1)} \cdot \frac{k_{np}}{T_0 \cdot p + 1}}. \quad (17)$$

За потреби прискорити час перехідного процесу відносно кроку в бажаній ВАХ потрібно зменшити  $T_m$ , що призведе до збільшення частоти зрізу бажаної ВАХ  $\omega_{зр}$ .

На рис. 8 наведено результати моделювання вихідної напруги при ступінчастому завданні величини вихідної напруги 300 В.

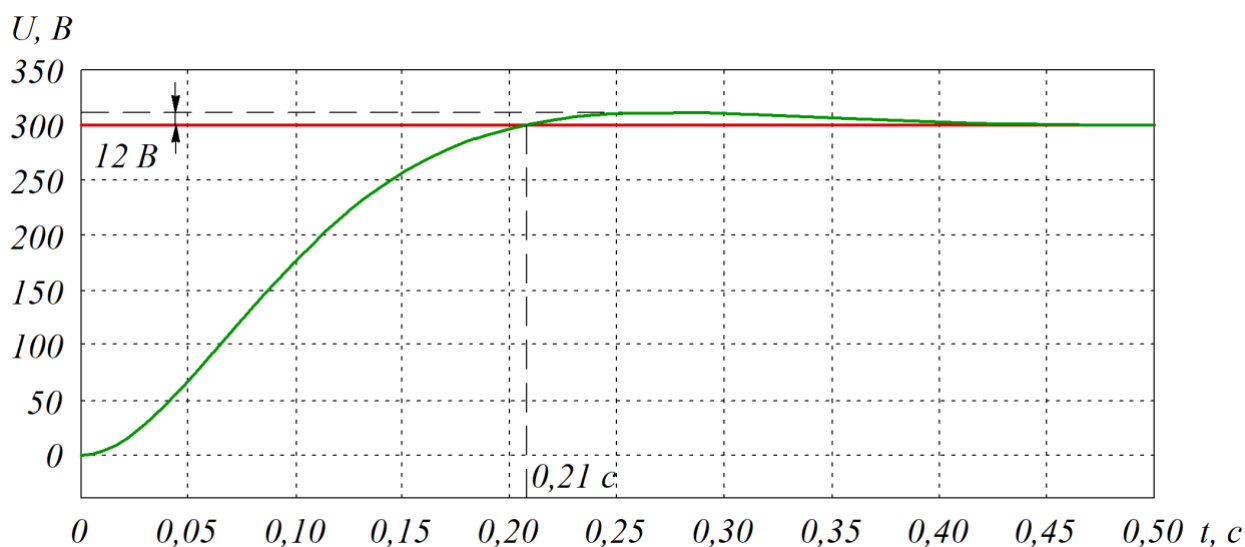


Рис. 8. Моделювання вихідної напруги при ступінчастому завданні

Як видно з рис. 8, величина перерегулювання вихідної напруги становить 12 В, тобто 4 %, що передбачалось при завданні системи на модальний оптимум.

При цьому час виходу на встановлене значення складає 0,21 с, що відповідає значенню  $T_\mu = 0,0$  с.

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

– аналітичні вирази дають змогу визначити статичні регульовальні характеристики активного випрямляча електричного рухомого складу залізничного

транспорту; показано, що регульовальна характеристика нелінійна, а статичний коефіцієнт передачі активного випрямляча залежить від струму навантаження;

– динамічні регульовальні характеристики активного випрямляча представлено шляхом отримання передавальної функції активного трифазного випрямляча на основі аналізу частотного значення у вихідній напрузі активного випрямляча. У канал керування додано сигнали різної частоти;

– на основі отриманої АЧХ перетворювача методом налаштування системи для модального оптимуму виконано синтез регулятора вихідної напруги, отримано осцилограми перехідного процесу вихідної напруги при авторегулюванні;

– враховуючи те, що статичний коефіцієнт передачі системи керування активного випрямляча залежить від струму навантаження, то для отримання однозначності перехідного процесу при

регулюванні вихідної напруги необхідно створення адаптивного регулятора за параметром вихідного струму активного випрямляча.

*Роботу виконано за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).*

### Список використаних джерел

1. Chomat M. Operation of active front-end rectifier in electric drive under unbalanced voltage supply. *Electric Machines and Drives*. 2011. P. 195–216. DOI: 10.5772/14295.
2. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Karpenko N., Hordiienko D., Butova O., Khoruzhevskiy H. Research into energy characteristics of single-phase active four-quadrant rectifiers with the improved hysteresis modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5, No. 8 (101). P. 36–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.179205.
3. Rodriguez J. R., Dixon J. W., Espinoza J. R., Pontt J., Lezana P. PWM regenerative rectifiers: state of the art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2005. Vol. 52 (1). P. 5–22. DOI: 10.1109/tie.2004.841149.
4. 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, Issue 4. P. 170–173.
5. Vazquez S., Leon J., Franquelo L., Rodriguez J., Young H., Marquez A., Zanchetta P. Model Predictive Control: a review of its applications in power electronics. *IEEE Ind Electron Mag*. 2014. Vol. 8 (1). P. 16–31.
6. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Control and accounting of parameters of electricity consumption in distribution networks. *2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. 2021. P. 114–117. DOI: 10.1109/MMA52675.2021.9610907.
7. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Sushko D., Ryshchenko I., Tsybulnyk V., Hordiienko D. Improving energy characteristics of AC electric rolling stock by using the three-level active four-quadrant rectifiers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, No. 8 (100). P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174112.
8. Wei L., Jankovic Z., Patel Y. P., Hu J. Single phase precharge control method for active front end rectifier. *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ecce.2016.7855436.
9. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Ananieva O., Zinchenko O. Analysis of the Smart Grid concept for DC power supply systems. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2019. Vol. 4, Issue 4. P. 179–182.
10. Venkatramanan D., Bharadwaj P., Adapa A. K., John V. Power Conversion Technologies for High-Performance AC Micro-grid. *INAE Lett*. 2019. Vol. 4, Issue 1. P. 27–35.
11. Barbie E., Kuperman A., Rabinovici R. A Novel Active Three-Phase Multilevel Power Factor Correction Rectifier. *2018 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering (ICSEE)*. 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICSEE.2018.8646113.

12. Щербак Я. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П. Регулювальні характеристики активного чотириквadrантного перетворювача в режимах випрямлення і рекуперації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 26–31. DOI: 10.15407/techned2017.06.026.
13. Chan R., Kwak S. Model-based predictive current control method with constant switching frequency for single-phase voltage source inverters. *Energies*. 2017. Vol. 10. P. 1–21. DOI: 10.3390/en10111927.
14. Kouro S., Cortes P., Vargas R., Ammann U., Rodriguez J. Model predictive control – a simple and powerful method to control power converters. *IEEE Trans Ind Electron*. 2009. Vol. 56 (6). P. 1826–1838. DOI: 10.1109/TIE.2008.2008349.
15. Song W., Ma J., Zhou L., Feng X. Deadbeat predictive power control of single-phase three-level neutral-point-clamped converters using space-vector modulation for electric railway traction. *IEEE Trans Power Electron*. 2015. Vol. 31. P. 721–732. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2400924.
16. Bohra A., Sajeesh D., Patel C., Saldanha M. Modulation techniques in single phase PWM rectifier. *IJCA Proceedings on International Conference on Advances in Science and Technology*. 2016. P. 5–7.
17. Deng F., Chen Z. Voltage-Balancing Method for Modular Multilevel Converters Switched at Grid Frequency. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. No. 62(5). P. 2835–2847. DOI: 10.1109/tie.2014.2362881.
18. Зниження динамічних втрат в активному однофазному чотириквadrантному перетворювачі з покращеним алгоритмом гістерезисної модуляції / О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. Л. Сушко, В. Є. Кавун. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 51. С. 88–94. DOI: 10.15407/publishing2018.51.088.
19. Martinez-Rodrigo F., Ramirez D., Rey-Boue A., de Pablo S., Herrero-de Lucas L. Modular Multilevel Converters: Control and Applications. *Energies*. 2017. No. 10 (11): 1709. 26 p. DOI: 10.3390/en10111709.
20. Dai P., Guoand G., Gong Z. A Selection Precharge Method for Modular Multilevel Converter. *International Journal of Control and Automation*. 2016. Vol. 9, No. 4. P. 161–170. DOI: 10.14257/ijca.2016.9.4.16.
21. Deng Y., Wang Y., Teo K. H., Harley R. G. A Simplified Space Vector Modulation Scheme for Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. P. 1–14. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2429595.
22. Нерубацький В. П. Регулювальні характеристики 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: матеріали III всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, фахівців, аспірантів (Маріуполь, 11–12 травня 2017 р.)*. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. С. 112–114.
23. Bashir S. B., Memon Z. A. An Improved Voltage Balancing Method for Grid Connected PV System Based on MMC Under Different Irradiance Conditions. *2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. 2018. P. 865–868. DOI: 10.1109/MWSCAS.2018.8623947.
24. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Kotlyarov V. Analysis of topologies of active four-quadrant rectifiers for implementing the INDUSTRY 4.0 principles in traffic power supply systems. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2019. Vol. 4, Issue 3. P. 106–109.
25. Щербак Я. В., Нерубацький В. П. Динамічний коефіцієнт передачі статичного перетворювача системи автоматичного регулювання електричним гальмуванням. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2015. Вип. 153. С. 5–12. DOI: 10.18664/1994-7852.153.2015.63861.
26. Щербак Я. В., Нерубацький В. П. Динамічні характеристики системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2013. № 1. С. 58–63.

27. Chang H. T., Chen H. C. Voltage Balancing Control for Four-Switch Three-Phase Active Front-End Rectifier. *2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition*. 2021. P. 1993–1998. DOI: 10.1109/ECCE-Asia49820.2021.9479135.
28. Tarisciotti L., Burgos M., Claudio D., Garcia C., Rodriguez J. Predictive zero-sequence control of parallel three-phase active rectifiers. *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2020. P. 2584–2591. DOI: 10.1109/ECCE44975.2020.9236146.
29. Rebollo E., Talavera D., Granizo R. Use of Discharge Resistor to Improve Transient De-Excitation in Brushless Synchronous Machines. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 1–17. DOI: 10.3390/en12132528.
30. Tandukar S., Baldwin T., Chiu S., Hamlett B. Education of Control and Over-Current Protection Strategy for Active Three-Phase Rectifiers. *2020 52nd North American Power Symposium (NAPS)*. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/NAPS50074.2021.9449767.
31. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Podnebenna S. Synthesis of a regulator recuperation mode a DC electric drive by creating a process of finite duration. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. P. 272–277. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575792.
32. Scherbak Ya., Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Shelest D., Semenenko Yu. Analysis of exact and approximating dependences of the active resistance of conductor on the frequency of current under the action of skin effect. *IEEE EUROCON 2021 – 19th International Conference on Smart Technologies*. P. 438–442. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535581.
- 

Нерубацький Володимир Павлович, канд. техн. наук, доцент, 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, канд. техн. 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.

Машура Артем В'ячеславович, аспірант кафедри промислової та біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (099) 000-23-34. E-mail: artemmashura94@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6016-7801.

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.

Варв'янська Вікторія Віталіївна, старший викладач кафедри промислової та біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (098) 405-20-56. E-mail: tvita62@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-4962-6245.

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.

Plakhtii Alexandr Andreevych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Mashura Artem Vyacheslavovych, Postgraduate, Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: +38 (099) 000-23-34. E-mail: artemmashura94@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6016-7801.

Hordiienko Denys Anatolievych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Varvianska Viktoria Vitalievna, Senior Lecturer, Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Tel.: +38 (098) 405-20-56. E-mail: tvita62@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-4962-6245.

Статтю прийнято 12.11.2021 р.



УДК 629.423

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА  
ПРИ НЕСИМЕТРІЇ ЖИВИЛЬНОЇ НАПРУГИ ТА АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ**

Канд. техн. наук В. В. Панченко, аспірант О. Г. Туренко

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF VOLTAGE ASYMMETRY ON THE OPERATION  
OF THE TRACTION ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR USING  
THE SIMULATION MODEL**

PhD (Tech.) V. Panchenko, postgraduate student O. Turenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648>

---

**Анотація.** У статті розглянуто імітаційне моделювання прямого пуску тягового асинхронного електродвигуна (АД) з несиметрією живильної напруги в програмному комплексі Ansys Electronics. Було отримано графіки частоти обертання та електромагнітного моменту при введенні несиметрії напруги фази А в 4 % при усталеному режимі роботи тягового асинхронного електродвигуна, а також проведено порівняння з характеристиками при симетричному живленні.

**Ключові слова:** тяговий асинхронний електродвигун, несиметричний режим живлення, імітаційна модель, Ansys Electronics.

**Abstract.** The asymmetry of the supply voltage adversely affects the operation of electric motors, in particular induction ones. With an uneven load of the phases of the network, the voltage becomes asymmetric - unequal between the individual phases. Voltage asymmetry leads to the fact that the currents in the phases of the stator winding of the electric motor differ sharply from one another. A phase with a high current can overheat above acceptable limits even with a small voltage unbalance. In addition, the active steel of the motor rotor overheats. Overheating of the motor winding causes an increase in electrical losses, ripples of the electromagnetic torque also appear, and other negative consequences. These factors can lead to process failure, accelerated insulation aging, or even motor failure.

In the event of a mains phase failure, running three-phase motors switch to single-phase mode. If the motor load before phase failure was no more than 60% of the rated value, then the motor continues to operate with slightly worse energy performance, the rotor speed decreases slightly, the winding temperature is within acceptable limits. Under heavy loads, the motor winding overheats excessively, and in some cases the motor rotor stops and a large current flows through two phases of the stator winding. After stopping the engine, it cannot be started even at idle, since a pulsating magnetic field is obtained in the engine with a single-phase current.

To study the effect of supply voltage asymmetry on the operation of an asynchronous electric motor, simulation modeling was carried out in the ANSYS Electronics software package for direct start of induction motor with the introduction of a supply voltage asymmetry of one of the phases at a level of 4% in the steady state operation of the electric motor. The characteristics of the rotation frequency and electromagnetic torque were obtained with asymmetry of the supply voltage and a comparison was made with the symmetrical mode of operation of the electric motor. The results of simulation show a slight change in the frequency of rotation of the rotor of the electric motor, however, there are significant ripples of the electromagnetic torque.

**Key words:** traction asynchronous electric motor, asymmetric power supply mode, simulation model, Ansys Electronics.

**Вступ.** Асинхронний двигун набув широкого розповсюдження як в простих системах нерегульованого електроприводу, так і в найскладніших сучасних системах регульованого електроприводу завдяки простоті конструкції, досить низькій собівартості та високому ККД.

Важливим фактором оптимальної експлуатації АД є його використання в номінальному режимі. Однак в умовах електрорухомого складу параметри АД можуть відхилятися, наприклад, внаслідок несиметрії живильної напруги. Навіть незначне відхилення живильної напруги призводить до значного зниження ККД та коефіцієнта потужності, що приводить до зниження максимальної потужності на валу двигуна [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** При розробленні та дослідженні АД пріоритетом є запобігання аварійних режимів роботи з метою підвищення терміну служби АД, економічного споживання електроенергії, скорочення витрат на ремонт [4]. Основним методом дослідження роботи АД є математичне моделювання в спеціалізованому програмному забезпеченні, наприклад Matlab [3].

Синтез математичних моделей АД в неповнофазному режимі (обрив фази статора та несиметрія напруги живлення) розглянуто в роботах [5–9], в умовах невисокої якості електричної енергії – в роботах [10, 11]. В роботі [2] розглянуто вплив відхилення напруги живильної мережі на ресурс ізоляції асинхронних двигунів. Робота [12] присвячена моделюванню несправного трифазного двигуна з використанням фільтра Калмана.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є дослідження впливу несиметричної напруги живлення на роботу тягового асинхронного електродвигуна та отримання характеристик його роботи. Для цього необхідно змоделювати прямий пуск АД та

ввести несиметрію в одну з фаз джерела живлення при усталеному режимі.

**Основна частина дослідження.** Несиметрія напруги – нерівність фазних та міжфазних напруг в усіх елементах тягових мереж, зумовлених несиметрією струмів. При несиметрії напруги в асинхронних електродвигунах виникають магнітні поля, що обертаються з подвійною синхронною швидкістю в протилежному напрямку обертання ротора. У результаті цього виникає гальмівний електромагнітний момент та нагрів двигуна за рахунок струмів подвійної частоти. Термін служби повністю навантаженого АД, який працює при несиметрії напруги 4 % зменшується в 2 рази, при несиметрії 5 % потужність двигуна зменшується на 5–10 %.

Аналіз впливу несиметрії напруг на характеристики АД можна проводити з використанням методу симетричних складових, що базується на принципах лінеаризації та накладення симетричних складових напруг прямої  $U_{пр}$ , зворотної  $U_{обр}$  та нульової  $U_0$  послідовностей. У випадках, коли в системі первинних напруг присутня нульова послідовність, по обмотці статора АД протікають три однофазних струми нульової послідовності, які не створюють обертового магнітного поля і обертового моменту в АД.

Для фази  $A$  напруги послідовностей визначаються зі співвідношень

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A_{np}} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C); \\ \dot{U}_{A_{обр}} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C); \\ \dot{U}_{A_0} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C),\end{aligned}\quad (1)$$

де  $a = e^{-j2\pi/3}$  – одиничний вектор, множення на який дає кутовий зсув на  $120^\circ$ ;  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  – напруги фаз несиметричної системи. Вектори напруг  $\dot{U}_{B_{np}}$  та  $\dot{U}_{C_{np}}$

визначаються вектором  $\dot{U}_{A_{np}}$ , вектори напруг  $\dot{U}_{B_{обр}}$  та  $\dot{U}_{C_{обр}}$  – вектором  $\dot{U}_{A_{обр}}$ , вектори напруг  $\dot{U}_{B_0}$  та  $\dot{U}_{C_0}$  – вектором  $\dot{U}_{A_0}$ .

Несиметрія напруг характеризується коефіцієнтами несиметрії для зворотної та нульової послідовностей

$$k_{обр, \%} = \frac{U_{A_{обр}}}{U_{A_{н}}} \cdot 100, \quad k_{0, \%} = \frac{U_{A_0}}{U_{A_{н}}} \cdot 100, \quad (2)$$

Нормально допустиме та гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії

для зворотної послідовності в точках загального приєднання до електричних мереж нормується 2 та 4 % відповідно. Однак, в системі тягового електропостачання змінного струму значення коефіцієнта несиметрії може сягати 6-12 %.

Для імітаційного моделювання впливу несиметрії на АД було використане програмне забезпечення Ansys Simplorer (рис. 1). Імітаційна модель складається з джерела трифазної напруги, асинхронного двигуна, блоку завдання несиметрії фазної напруги джерела живлення (1) та блоку завдання моменту опору (2). Як тестовий двигун було використано тяговий асинхронний електродвигун АД914 з параметрами, наведеними на рис. 2.

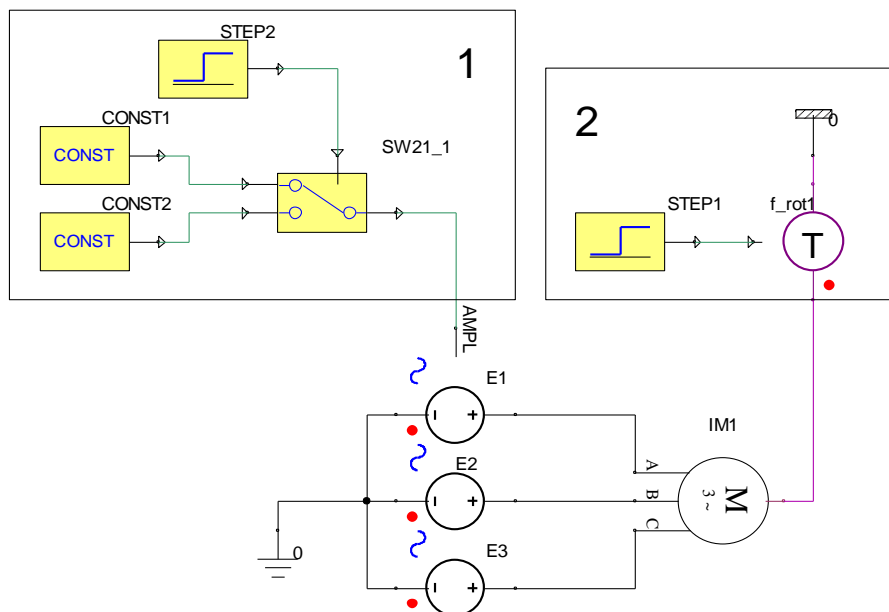


Рис. 1. Імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат

Parameters - IM1 - Induction Machine

Parameters | Output/Display

Name: IM1  Show

Description	Name	Value	Units
Number of Pole Pairs	P	3	
Moment of Inertia	J	15	kgm2
Main Inductance	LM	0.018	H
Stator Resistance	R1	0.0226	ohm
Stator Leakage Inductance	LS1	0.0006078	H
Rotor Resistance (related to stator side)	R2	0.0181	ohm
Rotor Leakage Inductance (related to stator side)	LS2	0.0004594	H
Initial Current Stator Phase a	I1A0	0	A
Initial Current Stator Phase b	I1B0	0	A
Initial Current Stator Phase c	I1C0	0	A
Initial Current Rotor Phase a	I2A0	0	A
Initial Current Rotor Phase b	I2B0	0	A
Initial Current Rotor Phase c	I2C0	0	A
Initial Rotor Position	PHI0	0	deg
Initial Rotor Speed	N0	0	rpm

Рис. 2. Параметри тягового асинхронного двигуна АД914

Для моделювання несиметрії напруги використовується перемикач, який змінює значення фазної напруги з номінального ( $U_n = 1100\text{ V}$ ) на знижене ( $U = 1056\text{ V}$ ), що відповідає несиметрії у 4 % в момент часу  $t = 1,4\text{ с}$ . Результати моделювання наведено

на рис. 3, 4. На рис. 3 зображено графік частоти обертання АД при несиметрії напруги живлення. На рис. 4 зображено порівняльний графік електромагнітного моменту при симетричному та несиметричному режимах живлення.

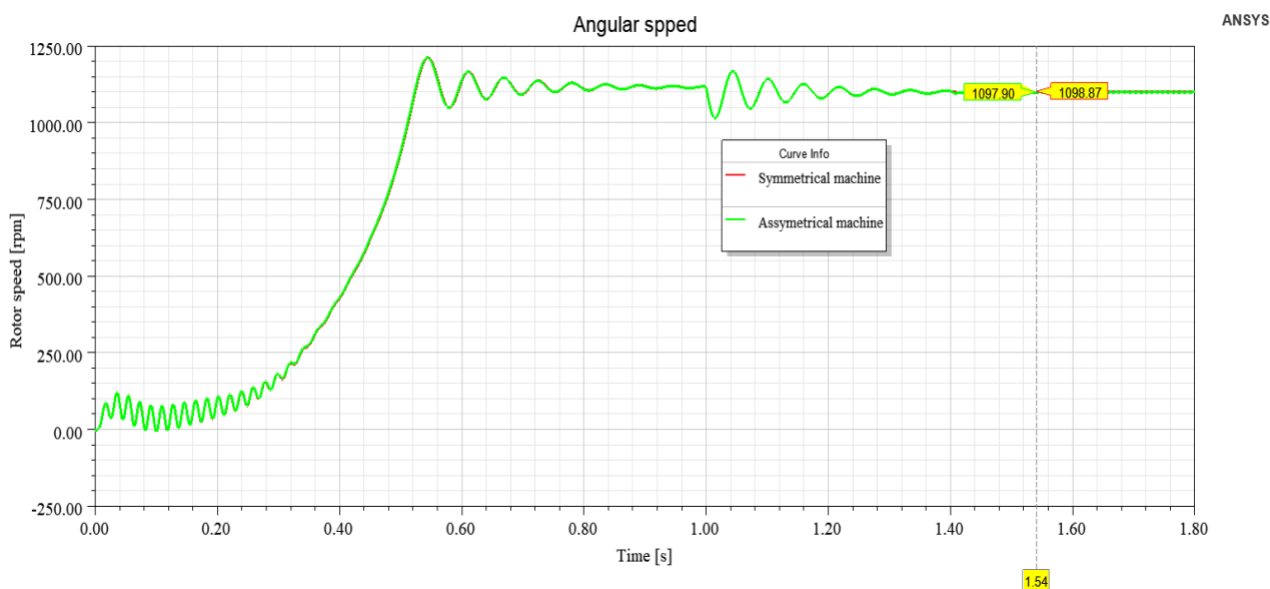


Рис. 3. Графік частоти обертання АД

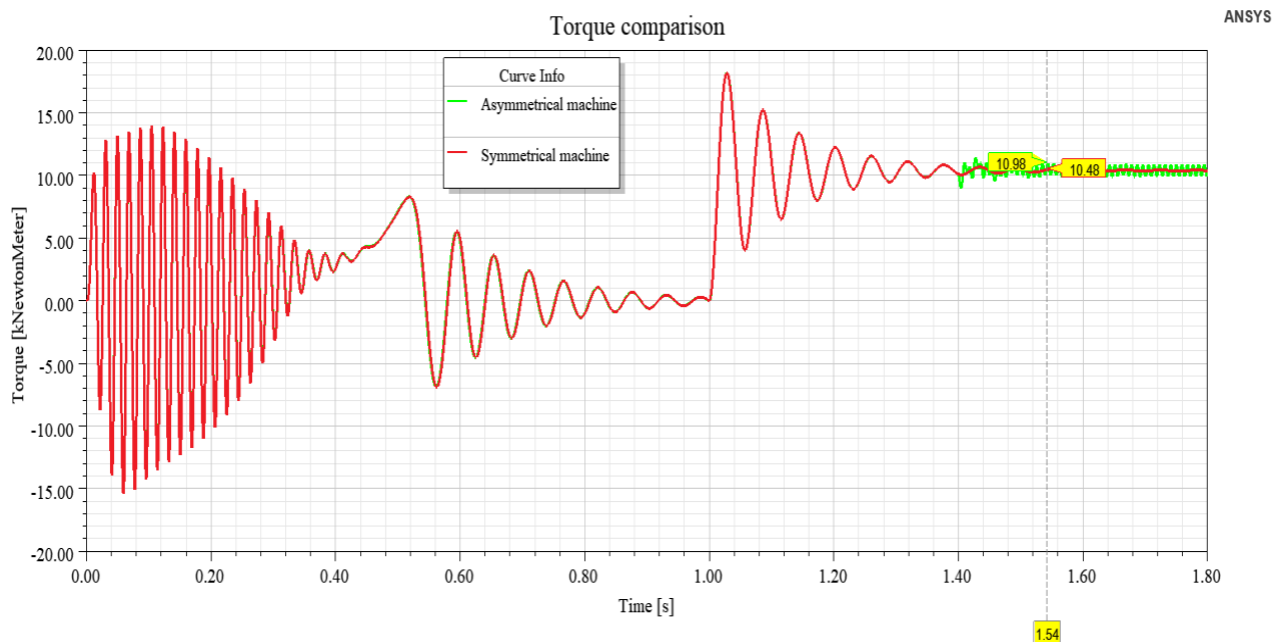


Рис. 4. Характеристика електромагнітного моменту при симетричному та несиметричному режимі живлення

**Висновки.** В результаті імітаційного моделювання в програмному середовищі Simplerger прямого пуску АД проаналізовано вплив несиметричної напруги живлення на його роботу та отримано графіки частоти обертання та електромагнітного моменту. З графіків видно, що відхилення напруги однієї фази на 4 % призводить до зниження

частоти обертання в межах 1 об/хв та значних пульсацій електромагнітного моменту  $\pm 5\%$  від номінального значення, що призводить до втрат активної потужності, нерівномірного споживання електроенергії та старіння ізоляції за рахунок додаткового нагріву обмоток двигуна.

### Список використаних джерел

1. Копылов И. П. Электрические машины: учеб. для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
2. Вовк О., Квітка С., Дідур В. Вплив відхилення живлячої напруги на ресурс ізоляції асинхронних електродвигунів потокових технологічних ліній. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. № 9 (1). doi: 10.31388/2220-8674-2019-1-25.
3. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
4. Pavlenko T., Shavkun V., Petrenko A. Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5(8 (89)). P. 22–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112109>.
5. Толочко О. И., Розкаряка П. И., Журов И. О. Моделирование асинхронного двигателя при обрыве фазы статора. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2014. № 15. С. 262-266.

6. Jannati M., Idris N., Aziz M. A new method for RFOC of Induction Motor under open-phase fault, *IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2013. P. 2530-2535. doi: 10.1109/IECON.2013.6699529.
  7. Jannati M., Idris N. R. N., Salam Z. A new method for modeling and vector control of unbalanced induction motors. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2012. P. 3625-3632. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342483.
  8. Jannati M., Fallah E. Modeling and vector control of unbalanced induction motors (faulty three phase or single phase induction motors). *1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*. 2010. P. 208-211. doi: 10.1109/PEDSTC.2010.5471830.
  9. Donolo P., Bossio G., De Angelo C., García G., Donolo M. Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. *Elect. Power Syst. Res.* Nov. 2016. Vol. 140, № 1. P. 866-873. doi: 10.1016/j.epsr.2016.04.018.
  10. Mousavi G., S. M., G., S. M. M., Langerudy A. T., Fuchs E., Al-Haddad K. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. № 62(5), P. 1–1. doi.org/10.1109/TIE.2014.2386794.
  11. Алгоритм розпознавання в задачах підвищення енергоефективності асинхронних двигателів, працюючих в умовах неякісної електроенергії / В. В. Кузнецов, А. В. Ніколенко, В. П. Иващенко, Н. М. Трипутень. *Вестник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків: НТУ ХПІ, 2017. Вип. 27 (1249). С. 95-99.
  12. Jannati M., Sutikno T., Idris N. R. N., Aziz J. A. Modeling of Balanced and Unbalanced Three-Phase Induction Motor under Balanced and Unbalanced Supply Based on Winding Function Method. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. August 2015. Vol. 5, № 4. P. 644-655. doi:10.11591/ijece.v5i4.pp644-655.
- 

Панченко Владислав Вадимович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD:

<https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>. E-mail: panchenko\_vv@kart.edu.ua

Туренко Олександр Геннадійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID: 0000-0002-7592-7455. Тел. +380950539075. E-mail: aleksandrturenko97@gmail.com.

Panchenko Vladyslav, PhD (Tech). Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD:

<https://orcid.org/0000-0003-4822-7151> E-mail: panchenko\_vv@kart.edu.ua

Turenko Oleksandr, postgraduate student, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: 0000-0002-7592-7455. Tel. +380950539075. E-mail: aleksandrturenko97@gmail.com.

Статтю прийнято 12.11.2021 р.

**ОГЛЯДОВІ СТАТТІ**

---

---

УДК 629.42/41.71

**ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОВОЗІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ АЗЕРБАЙДЖАНСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ**

Канд. техн. наук І. Ш. Елязов, старш. викл. І. Д. Гусейнов, канд. техн. наук В. Г. Равлюк

**DETERMINATION OF TECHNICAL FEATURES OF THE NEW GENERATION ELECTRIC CARRIERS OF THE AZERBAIJANI RAILWAY**

PhD (Tech.) Israel Elyazov, Sr. lecturer Iham Huseynov, PhD (Tech.) V. Ravlyuk

***Анотація.** У статті розглянуто основні завдання, що стоять перед локомотивною галуззю ЗАТ «Азербайджанські залізниці», проаналізовано існуючу матеріально-технічну базу локомотивного парку й обґрунтовано застосування сучасних локомотивів. Наведено технічні вимоги й енергетичні параметри, які висуваються до локомотивів і автотранспортних засобів в умовах експлуатації. Науково обґрунтовано принципи й напрямки концентрації та спеціалізації щодо створення матеріально-технічної бази для технічного обслуговування та ремонту інноваційних локомотивів. Проведено комплексні дослідження технічних параметрів в експлуатаційних умовах сучасних локомотивів, обґрунтовано їх застосування на залізниці.*

***Ключові слова:** локомотив, постійний та змінний струм, залізниця, депо, асинхронний тяговий двигун, тяга, ремонт, схема, інвертор, регулятор.*

***Abstract.** The main issues facing the locomotive economy were examined at the Azerbaijan Railways CJSC and the existing logistics base of the locomotive park was analyzed. It was expedient to purchase new locomotives showing the age structure of the Locomotive Park. For this purpose, the development of technical requirements for the production and commissioning of new locomotives and motor vehicles, as well as the development of material and technical basis for the technical maintenance and repair system, as well as the development of advanced repair technology.*

*The ATD uses the Az4A and Az8A electric locomotives from the new power circuits of static converters of electric motors in the main electric locomotives, and the functional circuits and energetic diagrams of locomotives are installed. The use of asynchronous traction motors in new locomotives is 1.5 times higher than the engine power compared to the constant dynamics of direct current; This allows you to increase 2.0 times, ATD can operate at rated power at all speeds, use less non-ferrous metals, use less environmentally friendly materials, reduce the complexity of repair and maintenance. At the same time the number of locomotives decreases and the reliability and service life of locomotives increases. One of the main innovations in the new electric locomotives is the correct choice of structural schemes of traction transmission in the transmission of motion for the supply of ATD.*

*Functional diagrams and power schemes of locomotives are constructed using power supply circuits of static converters of electric static electric locomotives in the main electric locomotives using electric locomotives Az4A and Az8A. The article analyzes the existing material and technical base of the locomotive fleet in the system of Azerbaijan Railways. The structure of the locomotive*

*fleet and the tasks facing it are determined. The launch of international transport corridors and the growth of Azerbaijan's economic capacity have increased the demand for freight and passenger traffic. To this end, in connection with the purchase and commissioning of new locomotives and vehicles, the issues facing the Azerbaijani Railway will be resolved. As a result of the operation of new locomotives, the efficiency of the railway transport process will increase and train safety will be ensured. In connection with the commissioning of new locomotives in the locomotive industry, the following complex issues will be considered.*

**Keywords:** locomotive, direct and alternating current, railway, depot, asynchronous traction motor, traction, repair, scheme, inverter, regulator.

**Вступ.** Запуск міжнародних транспортних коридорів та зростання економічної потужності Азербайджану дає змогу збільшити попит на вантажні та пасажирські перевезення. Для виконання цього завдання необхідно використовувати рухомий склад, який буде відповідати сучасним вимогам.

Основним завданням локомотивного господарства є утримання локомотивів у справному стані відповідно до нормативно-технічних документів, забезпечуючи транспортний процес ефективним тяговим рухомим складом.

У локомотивному господарстві Азербайджанської залізниці є п'ять основних локомотивних депо (Біладжарі, Гянджа, Баку, Імішли та Джульфа) та чотири оборотні депо (Шабран, Боюк-Кесік, Уджар,

Саляни). Ці депо на сьогодні не відповідають технічним вимогам сучасності, оскільки були побудовані та введені в експлуатацію в 50-60-х роках минулого століття.

Матеріально-технічна база депо та наявні технології ремонту і модернізації не дають змоги застосовувати інноваційні технології. Якщо проаналізувати структуру наявного локомотивного парку Азербайджанської залізниці за останні 15 років, можна побачити, що 70 – 80 % локомотивного парку майже закінчив свій термін експлуатації. За результатами аналізу, який було проведено на Азербайджанській залізниці у 2020 році, база структурного парку локомотивів наведена в табл. 1 [4].

Таблиця 1

Структурна база даних локомотивного парку Азербайджанської залізниці

Роки	Електровози						Тепловози									Разом
	ВЛ8	VL10 <sup>у</sup>	ВЛ11 <sup>м</sup>	Е2М2	ВЛ11 <sup>м</sup>	Усього	ТЭ3	3ТЭ-10М	2ТЭ-10М	ТЭМ-1	ТЭМ-2	ЧМЭ-3	2М-62	ТЭ-33А	Усього	
1960-1970	11	9				20	1			1	2				4	24
1971-1980		1		1		2					26				26	28
1981-1990			20			20		8	7		21	7			43	63
1991-2020		2	9		4	15					1		2	10	13	28
Середній вік	56	42	24	40	4	33	49	29	29	51	39	29	12	3	32	32.5
Усього	11	12	29	1	4	57	1	8	7	1	50	7	2	10	86	143



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням аналізу роботи застосування нових локомотивів зі змінним і постійним струмом приділялося удосталь уваги в роботах багатьох фахівців [5–9]. У роботі [6] розглянуто питання підвищення енергетичних показників і зниження експлуатаційних витрат електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами в режимі рекуперативного гальмування. У праці [7] розглядаються деякі застосування силових електроніки в тягових системах і стаціонарних установках залізничного транспорту, а також згадуються майбутні можливості з урахуванням технічних і соціальних тенденцій у залізничній галузі. Перш за все деякі особливості залізничного навантаження і системи тягового електропостачання підсумовуються як проблеми, що мають вирішуватися засобами силових електроніки. У роботі [8] доведено, що нова стратегія підвищення рівня енергозбереження в галузі тягового рухомого складу реалізується завдяки закупівлі нових енергоекономічних електровозів і модернізації наявного експлуатаційного парку. Електровози змінного струму зарубіжних залізниць, обладнані колекторними тяговими двигунами, мають низький рівень енергетичних параметрів у режимах тяги і рекуперативного гальмування, що призводить до значного споживання електроенергії та зростання експлуатаційних витрат, що неприпустимо в складних політичних та економічних умовах. Для підвищення енергоефективності електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами і з тиристорними перетворювачами запропоновано безліч способів і реалізовано чимало технічних рішень, однак проблема залишається актуальною. Аналіз науково-технічних джерел щодо використання локомотивів на змінному або постійному струмі показує, що в сучасних транспортних засобах тягові двигуни мають кращі

технічні й економічні показники, ніж на залізничному транспорті.

З табл. 1 видно, що середній вік експлуатації електровозів становить 33 роки, а тепловозів – 32 роки. Звідси випливає, що локомотиви досягли кінцевого терміну експлуатації, у зв'язку з цим локомотивний парк потребує негайного оновлення.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є обґрунтування доцільності застосування сучасних локомотивів на Азербайджанській залізниці.

Для досягнення сформульованої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз локомотивного парку мережі депо Азербайджанської залізниці;

- здійснити порівняльну оцінку технічних параметрів існуючих і сучасних локомотивів Азербайджанської залізниці, за результатами якої обрати тяговий рухомий склад, який буде відповідати умовам експлуатації.

**Основна частина дослідження.** У 2014 році було підписано угоду між ЗАТ «Азербайджанська залізниця» та французькою компанією TRANSPORT ALSTOM. Відповідно до цієї угоди ALSTOM розробив і поставив на Азербайджанську залізницю 10 пасажирських локомотивів серії Az4A, які є двосистемними (3,0 кВ постійного струму, 25 кВ змінного струму) та 40 електровозів змінного струму серії Az8A, що використовуються для вантажних перевезень. Основною метою електровоза Az8A є організація ефективного здійснення місцевих і транзитних вантажних перевезень в Азербайджані на транспортних коридорах TRACECA та Північ-Південь замість застарілих локомотивів. Інноваційний електровоз Az4A створений для експлуатації в Азербайджані для внутрішніх пасажирських перевезень та міжнародних пасажирських перевезень за маршрутом Баку-Тбілісі-Карс.

Обидві серії електровозів є версіями електровоза Prima M4 компанії Alstom і мають можливість рухатися на високих швидкостях залізницею. Електровози серій AZ8A і AZ4A є повністю адаптованими до Азербайджанської залізниці. Вони відповідають усім характеристикам, що висуваються до електровозів нового покоління, а саме: висока потужність, економічність, відмінні тягові і швидкісні характеристики, надійність і ергономіка. Електровози серії AZ8A і AZ4A розроблені французькою компанією «ALSTOM TRANSPORT» відповідно до технічного завдання ЗАТ «Азербайджанська залізниця». Вибір основного обладнання для створення цих електровозів здійснювався таким чином, щоб забезпечити їх повну відповідність вимогам стандартів, норм безпеки NB ZhT СТ 04-98 та іншим нормативно-технічним документам, чинним в Азербайджані.

Електровоз Az4A — це чотиривісний ( $B_0 - B_0$  або  $2_0 - 2_0$ ) основний пасажирський локомотив з асинхронними тяговими двигунами, односекційний із двома кабінами управління й двома візками, здатний працювати за системою багатьох одиниць. Електровоз оснащений рекуперативною гальмовою системою, що працює як від 3 кВ постійного струму, так і від 25 кВ змінного струму за частоти 50 Гц [3].

Обладнання, розташоване в машинному відділенні електровоза, встановлене по обидва боки від центрального коридору. Обидві кабіни пов'язані між собою коридором. Основні технічні характеристики нових електровозів Az4A та Az8A наведені в табл. 2 [3].

Застосування асинхронних тягових електродвигунів у нових локомотивах дає змогу реалізовувати потужність, яка в 1,5–2,0 рази вища за потужність тягових електродвигунів постійного струму.

Таблиця 2

Основні технічні характеристики електровозів Az4A та Az8A

№ з/п	Показник	Тип електровоза	
		Az4A	Az8A
1	Довжина за осями автотзчеплення, мм	$2L_{av} = 19000$	$2L_{av} = 35000$
2	Максимальна конструктивна швидкість, км/год	160	120
3	Швидкість тривалого режиму, км/год	84	50
4	Нормальна напруга контактної мережі, В	$U=25000/50\text{Hz}$ , $U=3000$	$U=25000/50\text{Hz}$
5	Осьова формула	$B_0-B_0$ або $2_0-2_0$	$2(B_0-B_0)$ або $2(2_0-2_0)$
6	Годинна потужність, кВт	4800	8800
7	Сила тяги при рушанні з місця, кН	268	833
8	Сила тяги локомотива в номінальному режимі, кН	82	
9	Допустима відстань від головки рейки до осі автотзчепи, мм	980–1080	980–1080
10	Маса, т	90,2	200
11	Осьове навантаження на рейки, кН	250	250

Використання асинхронних тягових електродвигунів у нових локомотивах у 1,5 рази перевищує потужність двигуна порівняно з ТЕД постійного струму, може

працювати з номінальною потужністю на всіх швидкостях, менше використовувати кольорових металів при виготовленні, менше використовувати екологічно

шкідливих матеріалів, зменшити трудомісткість служби ремонту та обслуговування. Одночасно для забезпечення процесу вантажних і пасажирських перевезень суттєво зменшується кількість локомотивів, так само збільшується надійність і термін служби локомотивів. Одним з головних нововведень у нових електровозах є правильний вибір варіантів структурних схем тягової передачі при передачі руху для подачі АТД [2]. Функціональна схема та схема передачі потужності локомотивів Az4A та Az8A побудовані на основі схем

живлення статичних перетворювачів, що застосовуються переважно в електровозах АТД.

На рис. 1 наведено блок-схему електричної частини електровоза постійного струму Az4 АТД. Така структурна схема дає змогу по осях регулювати тягу електровоза. У секції встановлено два рихтувальні пристрої. На рис. 2 зображено блок-схему електричної частини секції 1 електровоза змінного струму Az8A з АТД. У кожній секції локомотива встановлений один тяговий трансформатор і два керовані випрямлячі.

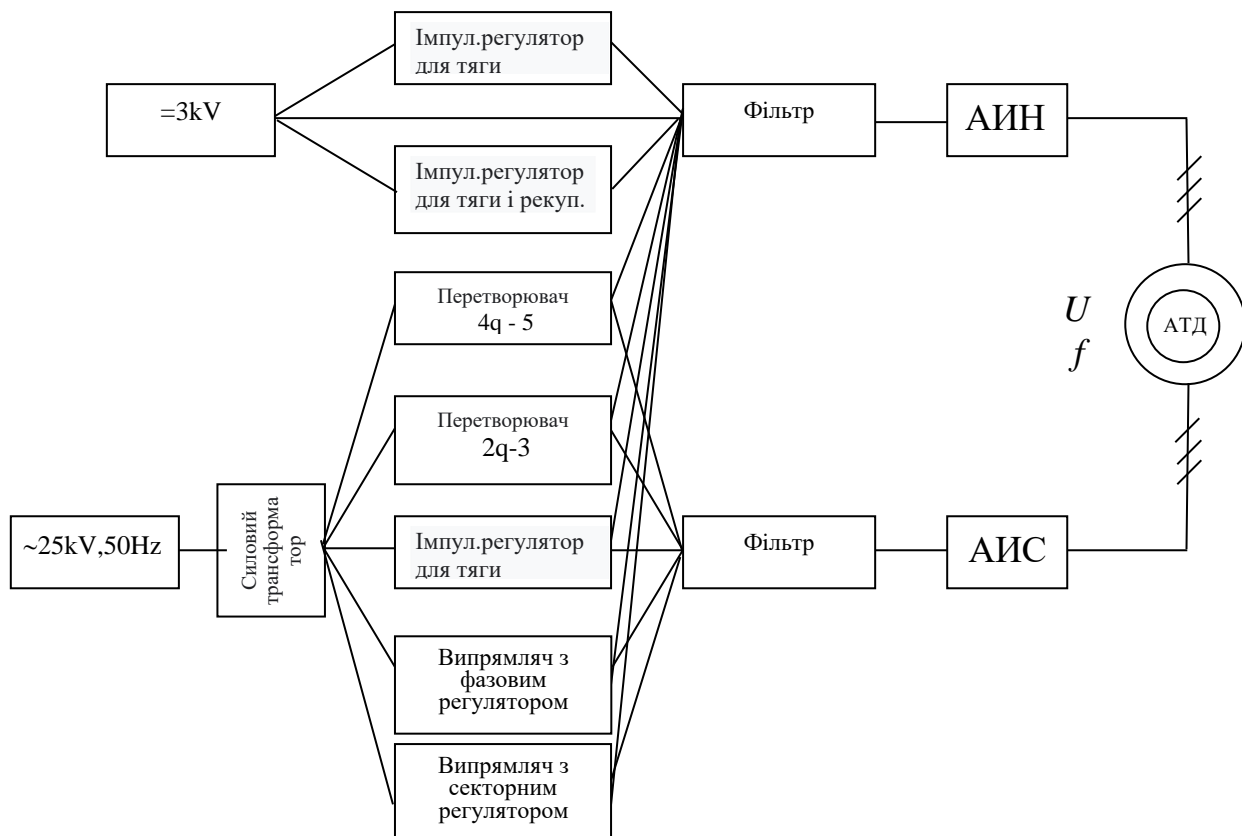


Рис. 1. Блок-схема електричної частини електровоза постійного струму Az4A

Електровози Az8A і Az4A виготовлені спеціально для залізниці Азербайджану, мають багато нових конструктивних вузлів як у механічній частині, так і в електричному обладнанні, що значно відрізняються від відповідних вузлів і агрегатів електровозів, побудованих в інших

країнах. На рис. 3 показана блок-схема електричної частини секції 1 електровоза змінного струму Az8A з АТД. У кожній секції локомотива встановлено один тяговий трансформатор, від 2-ї обмотки трансформатора живляться два керовані випрямлячі (позначені штангою).

Енергетична схема електровоза Az8A при тривалій експлуатації наведена на рис. 4. Зі схеми видно, що в тривалому режимі межа ККД локомотива становить не менше 0,8. При цьому втрати потужності не перевищують 15–18 %. Майже 17 % енергії, яка споживається від контактної мережі, використовується на втрати потужності локомотивного обладнання. На сьогодні 20 із цих локомотивів (Az4A та Az8A) доставлені на Азербайджанську залізницю до Бакинського локомотивного депо. Для введення в експлуатацію цих локомотивів здійснюються комплексні експлуатаційні випробовування на заданих полігонах

залізниці. Після таких випробовувань і підтвердження технічних параметрів електровозів їх можна буде використовувати для вантажних і пасажирських перевезень.

Електровози Az4A та Az8A мають ряд переваг перед наявним локомотивним парком Азербайджанської залізниці з точки зору їх тягових енергетичних показників:

- у 2-3 рази більше поїздок між ремонтом;
- на 20 % менше споживання електроенергії;
- збільшення ваги поїзда до 50 %.

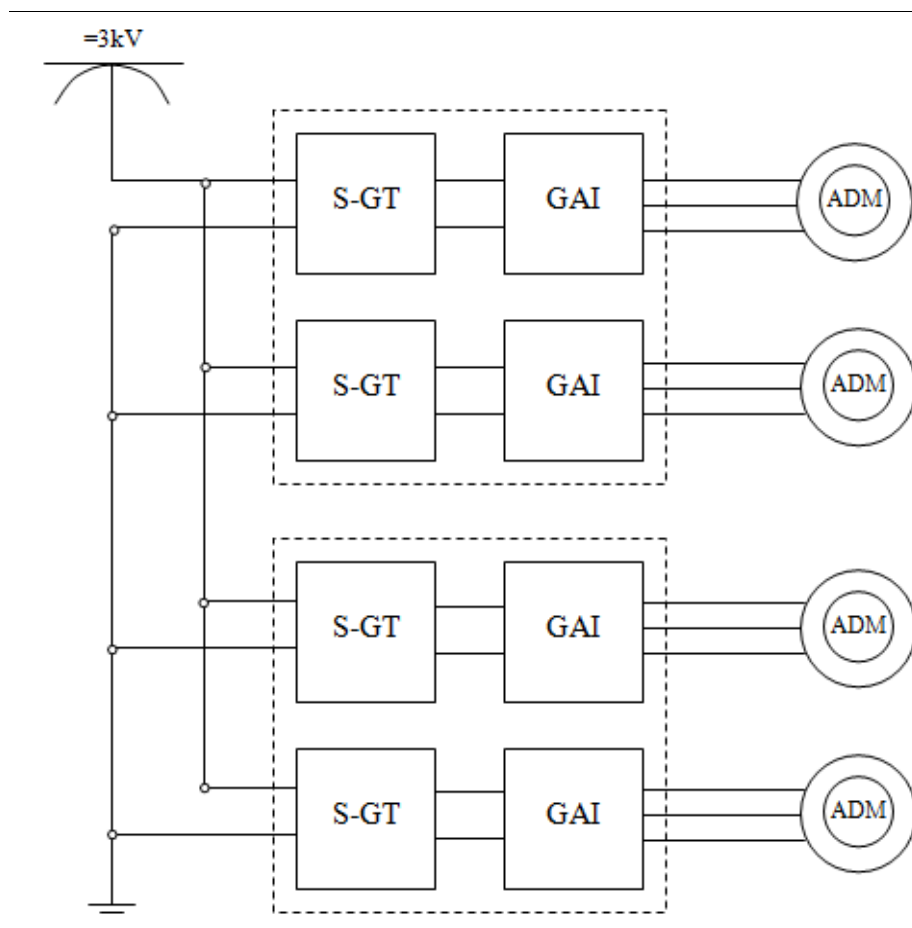


Рис. 2. Структурна схема електричної частини 4-вісного електровоза на постійному струмі: GT-регулятор напруги; S-струмовий фільтр; АДМ-асинхронний тяговий двигун

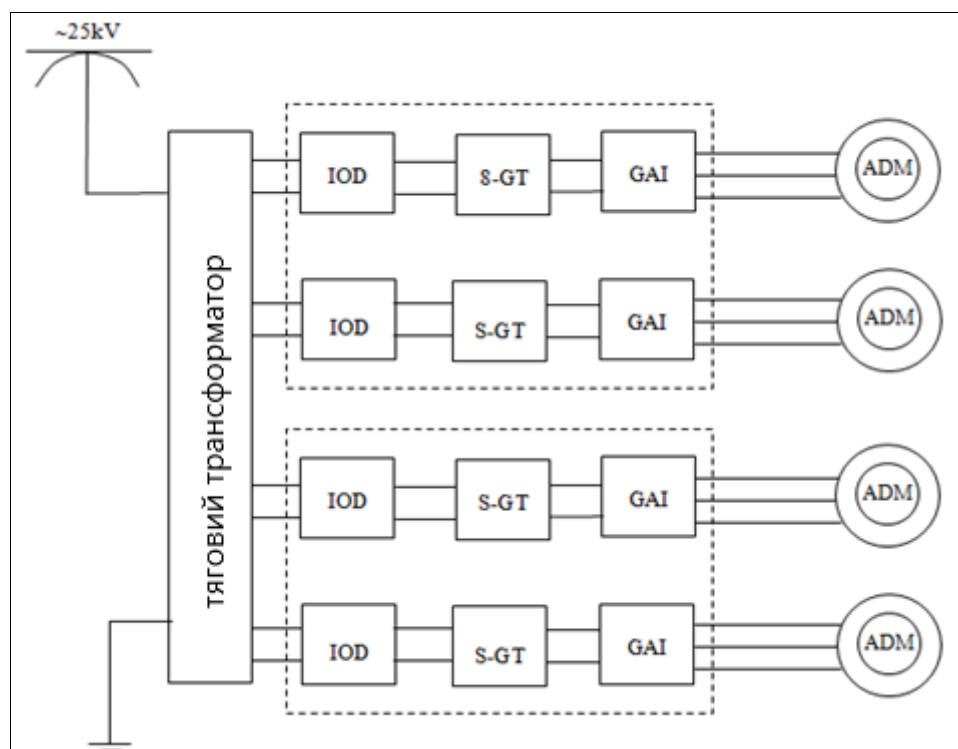


Рис. 3. Структурна схема електричної частини 8-вісного (односекційного) електровоза на змінному струмі: IOD-керований випрямляч - тип 4qS

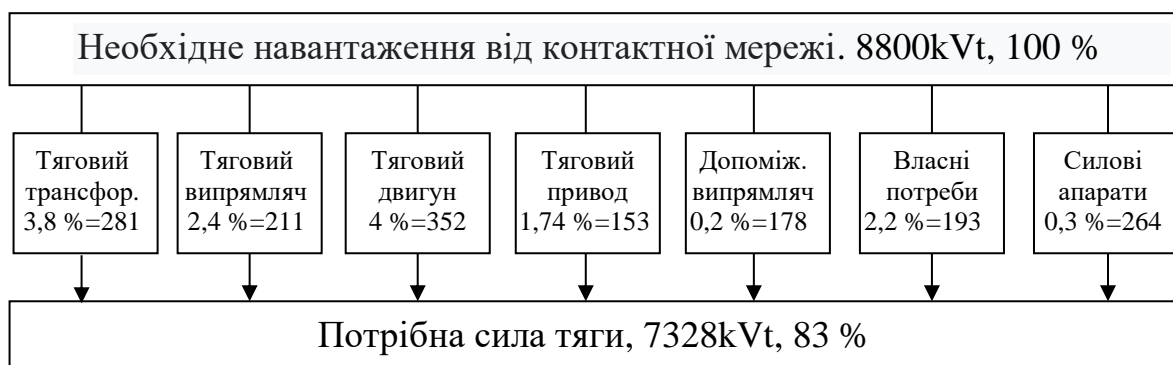


Рис. 4. Структурна енергетична схема електровоза Az8A, що експлуатується в тривалому режимі

У результаті придбання та введення в експлуатацію сучасних локомотивів на Азербайджанській залізниці будуть значно збільшені економічні показники залізничного транспорту та поліпшена безпека руху поїздів.

**Висновки.** У статті проаналізовано матеріально-технічну базу наявного локомотивного парку в системі залізниць Азербайджану та обґрунтовано закупівлю

нових локомотивів. Визначено структуру локомотивного парку та завдання, що стоять перед ними. Визначено характеристики енергії нових електровозів Az4A та Az8A на Азербайджанській залізниці та складено структурні схеми ланцюга живлення локомотивів. Тягові випробування показали, що використання електровозів з асинхронним тяговим двигуном на Азербайджанській залізниці дало змогу

зменшити експлуатаційні витрати на 20 %. Запуск міжнародних транспортних коридорів та зростання економічної сили Азербайджану збільшують попит на вантажні та пасажирські перевезення. Для

цього було розроблено технічні вимоги та основні тягові й енергетичні параметри для закупівлі та введення в експлуатацію нових локомотивів і моторного рухомого складу.

### Список використаних джерел

1. Фуфрянский Н. А., Долганов А. Н., Нестрахов А. С. Развитие локомотивной тяги. Москва: Транспорт, 1988. 344 с.
2. Грищенко А. В., Стрекопытов В. В. Электрические машины и статические преобразователи подвижного состава. Москва: Академия, 2005. 320 с.
3. Официальный сайт электровозоборочного завода в г. Астана. Казахстан. URL: <http://ekz.com.kz> (дата звернення: 12.05.2021).
4. «Azərbaycan Dəmir yolları» QSC Bakı 2020 il. URL: <http://railway.gov.az> (дата звернення: 19.06.2021).
5. Асланов Д. Г., Ершов А. В., Зинулла Е. Анализ результатов испытаний и базовых характеристик электровозов KZ8A и KZ4AT, планируемых к эксплуатации на Азербайджанских железных дорогах. *Новости Науки Казахстана*. Алматы, 2015. № 4. С. 88–94.
6. Шрамко С. Г. Повышение эффективности эксплуатации электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения. *Вестник ИрГТУ*. 2016. № 4 (111). С. 192–199.
7. Hitoshi Hayashiya, Keiichiro Kondo, Recent trends in power electronics applications as solutions in electric railways. *Institute of electrical engineers of Japan*, Vol.15. Iss. 5. 2020. P. 632–645.
8. Васильев И. П., Тулупов В. Д. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока с коллекторным приводом. *Вестник МЭИ*. 2016. № 4. С. 88–91.
9. Киржнер Д. Л. Требования к новому тяговому подвижному составу. *Железнодорожный транспорт*. 2007. № 8. С. 13–14.

---

Елязов Ізраїл Шукур огли, канд. техн. наук, доцент кафедри транспортної техніки та технологій управління Азербайджанського технічного університету. Тел.: +994 (050) 664-4271, E-mail: [iselyazov@beu.edu.az](mailto:iselyazov@beu.edu.az)  
Гусейнов Ільхам Дільгам огли, старш. виклад. кафедри транспортної логістики та безпеки руху Азербайджанського технічного університету. Тел.: +994 (051) 303-0183, E-mail: [ilham.huseynov83@mail.ru](mailto:ilham.huseynov83@mail.ru)  
Равлюк Василь Григорович канд. техн. наук, доцент кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: [ravvg@ukr.net](mailto:ravvg@ukr.net)

Elyazov Izrail Shukur oglu, PhD (Tech). Associate professor, Department of "Transport Engineering and Technology Management" of the Azerbaijan Technical University. Tel: +994 (050) 664-42-71, E-mail: [iselyazov@beu.edu.az](mailto:iselyazov@beu.edu.az)  
Huseynov Ilham Dilgam ogli, senior wkladach of the department "Transport logistics and the spirit of safety" of the Azerbaijan Technical University. Tel: +994 (051) 303-01-83, E-mail: [ilham.huseynov83@mail.ru](mailto:ilham.huseynov83@mail.ru)  
Ravlyuk Vasyl G. PhD (Tech). Associate professor, Department of cars, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: [ravvg@ukr.net](mailto:ravvg@ukr.net)

Статтю прийнято 05.10.2021 р.

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

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

*Випуск 198*

«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., Еткало О. О.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 28.12.2021 р.  
Формат паперу А4. Папір писальний.  
Умовн. друк. арк. 14,0. Тираж 55. Замовлення № .

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