



**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 175*

**Харків 2018**

## **УДК 656.2(062)**

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

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

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

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

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

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

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

### **Реферативна база**

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

**ISSN (p) 1994-7852**

**ISSN (online) 2413-3795**

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р.  
Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 2 від 27 лютого 2018 р.

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

## ЗМІСТ

### Механічна інженерія (13. 132, 133)

- Панченко С. В., Воронін С. В., Ремарчук М. П., Асадов Б. С.* Обґрунтування вимог до мастильних матеріалів систем автоматичного змащування рейок 6

### Теплоенергетика (144)

- Falendysh A., Chyhyryk N., Kosariiev O.* Automated system of selection multiple units rolling stock rolling stock for conversion to hydrogen fuel 12

### Транспортні технології (275)

- Ломотько Д. В., Лебедь Є. Ю.* Удосконалення технології сервісного обслуговування пасажирів на станції в умовах швидкісного руху 24
- Супрун О. Д., Семененко О. І., Семененко Ю. О.* Підвищення енергетичної ефективності в системах нетягового електропостачання 32
- Мартинов І. Е., Вітольберг В. Г., Потапов Д. О.* Параметри надійності роботи залізобетонних шпал у різних експлуатаційних умовах 46
- Фаст Д. А., Корнієнко О. В., Савін А. А., Христенко Є. А.* Дослідження опору костилів і шурупів при висмикуванні з дерев'яної шпали, відновленої полімером 57

### Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Kostiuk T. O., Plakhotnikov K. V.* Determination of thermal conductivity of composite material containing glass and aluminosilicate microspheres filled with air 63
- Золотова Н. М., Склярів В. О., Супрун О. Ю.* Технологічні рішення з оптимізації матеріало- і трудовитрат при анкероустановлювальних роботах з використанням акрилових композицій 70
- Гарькава О. В., Бариляк Б. А.* Розрахунок несучої здатності залізобетонних підкранових балок при косому згині 76
- Масюк Г. Х., Ющук О. В., Шайдюк О. А., Дзюбак С. І.* Експериментальні дослідження несучої здатності двопрольотних нерозрізних залізобетонних балок за дії малоциклових повторних і знакозмінних навантажень 83
- Кичаєва О. В., Стародубов С. Н., Убийвовк А. В.* Предложения по усилению поврежденных кирпичных конструкций 91
- Романюк В. В., Супрунюк В. В.* Особливості розрахунку прольотних конструкцій з перфорованих елементів за складного напружено-деформованого стану 98
- Борзяк О. С., Чепурна С. М.* Гідратація портландцементу в присутності добавки вискодисперсної крейди 109

**МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (13. 132, 133)**

---

УДК 621.89:625.032

**ОБҐРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО ЗМАЦЬУВАННЯ РЕЙОК**

Доктори техн. наук С. В. Панченко, С. В. Воронін, М. П. Ремарчук,  
асп. Б. С. Асадов

**ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СМАЗЫВАНИЯ РЕЛЬСОВ**

Доктора техн. наук С. В. Панченко, С. В. Воронин, Н. П. Ремарчук,  
асп. Б. С. Асадов

**SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS FOR LUBRICANTS OF AUTOMATIC LUBRICATION SYSTEMS OF RAILS**

Dr. of Techn. Sciences S. V. Panchenko, S. V. Voronin, M. P. Remarchyk,  
pg. student B. S. Asadov

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127020

---

*У статті розглядається питання обґрунтування вимог до мастильних матеріалів для автоматичного змащування рейок і гребенів коліс рухомого складу. Запропоновано механізм двошарового мащення поверхонь контакту рейки та колеса при застосуванні автоматичного змащування, який відповідає максимуму фактичної площі контакту і мінімуму напруження в контактї, сили тертя і зносу рейок і гребенів коліс. Отримано залежності для визначення мінімально достатніх концентрацій твердих антифрикційних легуючих добавок і поверхнево-активних речовин у мастильному матеріалі. Такі залежності є базовими для обґрунтування складу та будови мастильного матеріалу при застосуванні автоматичного змащування рейок і гребенів коліс з точки зору реалізації в контактї двошарового мащення. Вони враховують номінальну площу тертя, мікрогеометрію контактуючих поверхонь, форму та розміри легуючих частинок, товщину полімолекулярного граничного шару поверхнево-активних речовин.*

**Ключові слова:** рейка, колесо, контакт, знос, тертя, автоматичне змащування, легуюча добавка, концентрація.

*В статье рассматривается вопрос обоснования требований к смазочным материалам для устройств автоматического смазывания рельсов и гребней колес подвижного состава. Предложен механизм двухслойной смазки поверхностей контакта рельса и колеса при реализации автоматического смазывания. Получены зависимости для определения минимально достаточных концентраций антифрикционных легирующих добавок и поверхностно-активных веществ в смазочном материале.*

**Ключевые слова:** рельс, колесо, контакт, износ, трение, автоматическая смазка, легирующая добавка, концентрация.

*The article deals with the question of substantiation of requirements for lubricants for automatic lubrication of rails and crests of rolling stock wheels. The mechanism of two-layer placement of the surfaces of the contact between the rail and the wheel is proposed, with the application of automatic lubrication, which corresponds to the maximum of the actual contact area and the minimum stress in contact, the friction and wear of the rails and crests of the wheels. The obtained dependences for determining the minimum of sufficient concentrations of solid antifriction dopants and surfactants in the lubricant. Such dependencies are the basis for substantiating the composition and structure of the lubricant when applying automatic lubrication of rails and rims of wheels from the point of view of realization in the contact of two-layered lubrication. They take into account the nominal area of friction, the microheometry of contacting surfaces, the shape and size of alloying particles, the thickness of the polymolecular boundary layer of surfactants.*

**Key words:** rail, wheel, contact, wear, friction, automatic lubrication, alloying additive, concentration.

**Вступ.** При взаємодії рейок з колесами рухомого складу залізниць у приповерхневих шарах металу в зоні контакту виникають суттєві змінні напруження та сили тертя. Вони призводять до підвищеного зносу рейок і бандажів коліс. Це в першу чергу стосується рейок у кривих ділянках колії, швидкозношуваних елементів стрілочних переводів, гребенів коліс. Таким чином, в умовах експлуатації залізниць існує проблема забезпечення зносостійкості вказаних елементів. Дана проблема традиційно вирішується декількома шляхами, а саме забезпеченням потрібної міцності матеріалів рейок і бандажів коліс, геометричним наближенням до конформного контакту колеса та рейки і застосуванням змащування бокової поверхні рейки та гребенів коліс. З урахуванням досягнень матеріалознавства, технологій отримання рейкових і колісних сталей, технологій механічної обробки та зміцнення поверхневих шарів металу перші два методи досить глибоко вивчені, хоча й мають певні резерви щодо подальшого їх розвитку та застосування при вирішенні вказаної проблеми.

Найбільш перспективним методом боротьби зі зносом рейок і коліс, який сьогодні активно розвивається, є застосування змащування [1–3]. Цей метод досліджується та впроваджується в багатьох розвинутих країнах світу. Він

реалізується шляхом впровадження стаціонарних рейкозмащувачів і навісних гребенезмащувачів різноманітної конструкції. При цьому на сьогодні не існує єдиної думки щодо доцільності та ефективності використання таких змащувачів у певних місцях та умовах, й особливо типу мастильного матеріалу та методу його нанесення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі залізничні системи змащування (лубрикації) можна поділити на декілька груп [1, 2]:

– системи змащення гребенів, що встановлюються на локомотивах і моторвагонних рухомих складах;

– стаціонарні та пересувні колійні лубрикатори, що змащують бічні грані головки рейки в кривих і на стрілочних переводах.

У свою чергу конструктивне виконання системи змащування повністю залежить від виду мастильного матеріалу, що використовується. Так, наприклад, системи змащування, які встановлюються на рухомий склад, можуть обладнуватись форсунками для нанесення рідкого, пластичного або твердого мастильного матеріалу на реборди коліс. У стаціонарних і пересувних колійних лубрикаторах переважно застосовуються рідкі, напіврідкі та пластичні мастильні матеріали. Велика кількість мастильних матеріалів конструктивних виконань змащувачів свідчить про

відсутність узагальнених вимог до мастильних матеріалів, що застосовуються.

З іншого боку, роботи в галузі триботехніки формують такі головні вимоги до мастильних матеріалів: максимальна адгезія до твердої поверхні тертя і мінімальна когезія між їхніми молекулярними шарами [4, 5], при цьому досягається мінімум сил тертя в широкому діапазоні навантажень. З метою дотримання вказаних вимог до базових олив і мастил додають поверхнево-активні речовини – присадки, молекули яких мають електричний дипольний момент, внаслідок чого формують на поверхнях тертя граничні шари кристалічної будови. Такі шари, за дослідженнями [5, 6], мають властивості рідких кристалів, тобто високу несучу здатність у нормальному напрямку та низький опір дотичному зсуву.

Слід зазначити, що граничні шари ПАР утворюються лише на фактичній площині контакту, тобто на зношених (ювенільних) верхівках мікроскопічних виступів поверхонь тертя, які постійно утворюються за рахунок пружно-пластичного контакту, зсуву або зрізу мікроставів. Якщо несуча здатність граничного шару буде меншою, ніж діючий контактний тиск на поверхні, то такий шар зруйнується і не буде виконувати своїх функцій.

Враховуючи високі контактні напруження, з метою зменшення контактного тиску в парі тертя «колесо-рейка» слід виконати ще одну умову, а саме реалізувати двошарове мащення поверхонь [7, 8]. Таким чином, вирішення проблеми вибору мастильного матеріалу для автоматичних рейко- та гребенезмащувачів лежить у площині реалізації двошарового мащення.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою роботи є обґрунтування складу та будови мастильного матеріалу при застосуванні автоматичного змащування рейок і гребенів коліс з точки зору реалізації в контакті двошарового мащення. Відповідно до

поставленої мети основними завданнями є аналіз механізму взаємодії мастильних матеріалів різної будови з поверхнею тертя, впливу мастильного шару на контактні напруження, тертя і знос рейок і гребенів коліс рухомого складу.

**Основна частина дослідження.** При застосуванні автоматичних змащувачів сили тертя і знос у трибологічному контакті «колесо – рейка» залежать від багатьох факторів. Однак якщо врахувати лише вплив мастильної плівки двошарової будови, зв'язок між її властивостями і тертям і зносом можна аналітично подати як

$$I \propto f(\tau) \propto \frac{\sigma^m}{h^n} = \frac{k}{S_\phi^m \cdot h^n}, \quad (1)$$

де  $I$  – інтенсивність зношування;  $\tau$  – питома сила тертя;  $\sigma$  – напруження в контакті;  $h$  – товщина граничної плівки ПАР (другий шар);  $S_\phi$  – фактична площа контакту;  $m$  та  $n$  – показники ступеня;  $k$  – коефіцієнт пропорційності, що враховує вплив інших факторів (властивості матеріалів, температуру, швидкість тертя тощо).

Як відомо, при двошаровому змащуванні перший шар – підложка – розподіляє зовнішнє навантаження за рахунок заповнення впадин мікронерівностей поверхонь, а другий шар – кристалічний шар ПАР – сприймає зовнішнє розподілене навантаження, як зображено на рисунку.

У якості легуючих добавок застосовуються мікро- або наночастинки металів, графіту, дисульфиду молібдену, природних мінералів тощо. З метою їх стабілізації в розчині базової оливи перед уведенням їх вкривають тонкою плівкою маслорозчинних ПАР.

Виходячи з наведеної інформації можна встановити такі основні вимоги до мастильних матеріалів для автоматичних рейко- або гребенезмащувачів:

– мастильний матеріал повинен містити в собі мікроскопічні легуючі

частинки, вкриті оболонками ПАР, які мають високу адгезію до поверхні та заповнюють впадини мікронерівностей;

– мастильний матеріал повинен містити в собі достатню кількість присадок для формування на зношених верхівках

мікроскопічних виступів поверхонь тертя кристалічної граничної плівки;

– для забезпечення ефективного нанесення на поверхню тертя (наприклад, шляхом розпилювання) мастильний матеріал повинен мати необхідну в'язкісно-температурну характеристику.

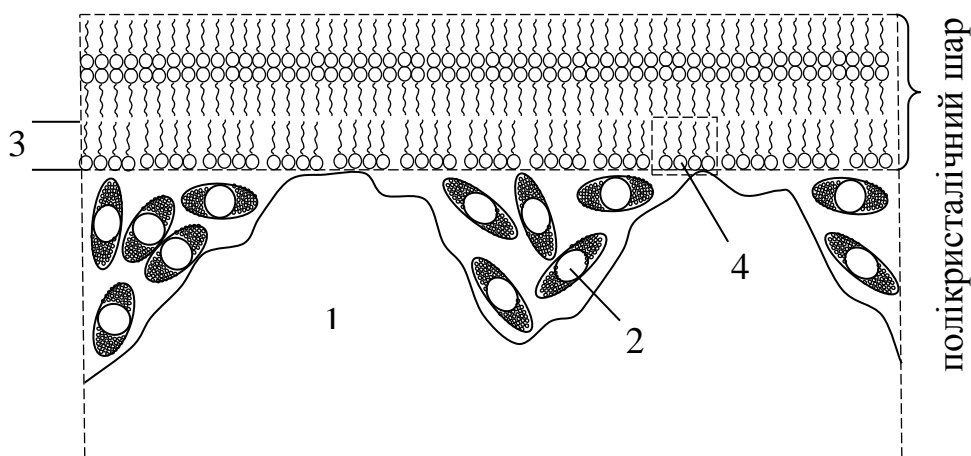


Рис. Фізичне уявлення про двошарове мащення поверхонь тертя:

1 – поверхня тертя; 2 – легуючі дисперсні добавки, вкриті оболонкою ПАР;

3 – монокристалічний шар присадки; 4 – «пакети» присадок

Вказаним вимогам відповідають рідкі мастильні матеріали, леговані частинками графіту або дисульфиду молібдену, які не лише заповнюють нерівності, але й проявляють антифрикційні властивості.

Ключовим питанням, з точки зору можливості реалізації двошарового мащення за рисунком, є визначення мінімально достатньої концентрації легуючих твердих частинок і ПАР в базовій оливі. Такі концентрації повинні встановлюватись за двох умов:

– концентрація легуючих дрібнодисперсних частинок повинна бути достатньою для заповнення всіх мікронерівностей з урахуванням площі поверхні, що змашується, і товщини граничного шару ПАР, яким вкриті легуючі частинки;

– концентрація ПАР повинна бути достатньою для формування граничних плівок на вільній поверхні легуючих

частинок і полікристалічного шару, як показано на рисунку, також з урахуванням площі поверхні, що змашується.

Якщо задати, що  $V_m$  – об'єм оливи, що наноситься на поверхню тертя площею  $S_H$  (вона ж – номінальна або контурна площа) за один цикл змашування, то концентрація легуючих частинок складе

$$c_v = \frac{V_\phi}{V_m} \cdot 100 \% , \quad (2)$$

де  $V_\phi$  – фактичний об'єм, який потрібно заповнити, що визначається розподілом і геометричними характеристиками мікронерівностей.

Концентрація ПАР визначається аналогічно виразу (2) і складає

$$c_a = \frac{(V_\phi - \sum V_v) + V_{nu}}{V_m} \cdot 100 \% , \quad (3)$$

де  $\Sigma V_c$  – загальний об’єм легуючих частинок, який залежить від їх форми та розмірів. Тобто вираз у скобках являє собою загальний об’єм граничних плівок ПАР на частинках, які заповнюють впадини нерівностей.

Друга складова виразу (3)  $V_{ни}$  – об’єм, який займає полікристалічний шар ПАР – другий шар на рисунку. Він визначається як

$$V_{ни} = h_{ни} \cdot S_n, \quad (4)$$

де  $h_{ни}$  – товщина полікристалічного шару ПАР.

Залежності (2) та (3) є базовими для обґрунтування складу та будови мастильного матеріалу при застосуванні автоматичного змащування рейок і гребенів коліс з точки зору реалізації в контакті двошарового мащення. Вони враховують загальну (номінальну) площу тертя, мікрогеометрію контактуючих поверхонь, форму та розміри легуючих частинок,

товщину полімолекулярного граничного шару ПАР.

#### Висновки:

1. Розглянуто механізм мащення поверхонь контакту рейки та колеса при застосуванні автоматичного змащування, відповідно до якого встановлено, що реалізація в контакті двошарового мащення дозволить наблизити фактичну площу контакту до величини контурної площі, і, як наслідок, зменшаться напруження в контакті, сили тертя і знос рейок і гребенів коліс.

2. Отримано базові залежності для обґрунтування складу та будови мастильного матеріалу при застосуванні автоматичного змащування рейок і гребенів коліс з точки зору реалізації в контакті двошарового мащення. Вони враховують загальну (номінальну) площу тертя, мікрогеометрію контактуючих поверхонь, форму та розміри легуючих частинок, товщину полімолекулярного граничного шару ПАР.

#### Список використаних джерел

1. Буйносов, А. П. Результаты применения системы гребнесмазывания АГС-8 на промышленном железнодорожном транспорте [Текст] / А. П. Буйносов, И. М. Пышный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 64-68.
2. Игнатъев, О. Л. Современные системы лубрикации трибопары «колесо-рельс» [Текст] / О. Л. Игнатъев, В. О. Говорунов // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 6. – № 3. – С. 148-152.
3. Voronin, S. Study of the predominant defect development in rails of underground systems after preventive grinding and lubrication [Text] / S. Voronin, O. Skoryk, V. Stefanov, D. Onoprychuk, Y. Korostelov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V.116.
4. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.
5. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А. С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
6. Лысиков, Е. Н. Влияние наноструктур присадки на трение и износ в технических системах [Текст] / Е. Н. Лысиков, С. В. Воронин // Фундаментальные и прикладные проблемы науки: Материалы VIII Междунар. симпозиума. – М.: РАН, 2013. – Т. 1. – С. 143-151.
7. Фукс, Г. И. Адсорбция и смазочная способность масел [Текст] / Г. И. Фукс // Трение и износ; [Академия наук СССР]. – 1983. – Т. 4, №3. – С. 398-414.



8. Лысиков, Е. Н. Надмолекулярные структуры жидких смазочных сред и их влияние на износ технических систем [Текст] / Е. Н. Лысиков, В. Б. Косолапов, С. В. Воронин. – Харьков : ЭДЭНА, 2009. – 274 с.

---

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, ректор Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-13. E-mail: info@kart.edu.ua.

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-66. E-mail: spprm@kart.edu.ua.

Ремарчук Микола Парфенійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-72. E-mail: spprm@kart.edu.ua.

Асадов Башир Сабірович, аспірант кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-66. E-mail: spprm@kart.edu.ua.

Панченко Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (057) 730-10-13. E-mail: info@kart.edu.ua.

Воронин Сергей Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных, путевых и погрузочно-разгрузочных машин Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (057) 730-10-66. E-mail: spprm@kart.edu.ua.

Ремарчук Николай Парфениевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных, путевых и погрузочно-разгрузочных машин Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (057) 730-10-72. E-mail: spprm@kart.edu.ua.

Асадов Башир Сабирович, аспирант кафедры строительных, путевых и погрузочно-разгрузочных машин Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (057) 730-10-66. E-mail: spprm@kart.edu.ua.

Panchenko Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-13. E-mail: info@kart.edu.ua.

Voronin Serhii, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Head of the Department of Construction, Travel and Cargo-Handling Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-66. E-mail: spprm@kart.edu.ua.

Remarchyk Mykola, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction, Travel and Cargo-Handling Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-72. E-mail: spprm@kart.edu.ua.

Asadov Bashir, graduate student of the Department of Construction, Travel and Cargo-Handling Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-66. E-mail: spprm@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 12.02.2018 р.

**ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)**

---

UDK 629.4.01

**AUTOMATED SYSTEM OF SELECTION MULTIPLE UNITS ROLLING STOCK ROLLING STOCK FOR CONVERSION TO HYDROGEN FUEL**

Doctor of techn. scienc. A. Falendysh, cand. of techn. scienc. N. Chyhyryk, master O. Kosariev

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИБОРУ МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ДЛЯ ПЕРЕВЕДЕННЯ ЙОГО НА ВОДНЕВЕ ПАЛИВО**

Д-р техн. наук. А. П. Фалендиш, канд. техн. наук Н. Д. Чигирик, магістр О. Косарєв

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА МОТОР-ВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ПЕРЕВОДА НА ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО**

Д-р техн. наук. А. П. Фалендыш, канд. техн. наук Н. Д. Чигирик, магистр А. Косарев

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127030

---

*The article considers options for using hydrogen as a fuel for multiple units rolling stock in Ukraine. An analysis was made of the rolling stock with its use in Japan and Germany. Considered fuel-economic indicators of operation of motor-wagon rolling stock in Ukraine at the moment and with the use of a proton-exchange membrane fuel cells on this rolling stock, the comparison and analysis of the data. Was created model for estimating the rolling stock on hydrogen fuel and determining the most efficient vehicles for modernization using proton exchange membrane fuel cells. Pre-determined the necessary equipment for modernization, creating a scheme for locating equipment on the rolling stock.*

**Key words:** hydrogen fuel, modernization, diesel rolling stock, fuel cells, polymer exchange membrane, fuel consumption.

*У статті розглянуто варіант використання водню в якості палива для моторвагонного рухомого складу в Україні. Проведено аналіз рухомого складу з його застосуванням у Японії і Німеччині. Розглянуто паливно-економічні показники експлуатації моторвагонного рухомого складу в Україні на даний момент з використанням протон-обмінних мембранних паливних елементів на цьому рухомому складі, проведено порівняння і аналіз отриманих даних. Розроблено модель оцінки рухомого складу на водневому паливі та визначено найбільш ефективний рухомий склад для модернізації з використанням протон-обмінних мембранних паливних елементів. Попередньо визначено необхідне обладнання для модернізації, розроблена схема розміщення обладнання на рухомому складі.*

**Ключові слова:** водневе паливо, модернізація, дизель-поїзд, паливні елементи, полімер обмінна мембрана, витрата палива.

*В статье рассмотрен вариант использования водорода в качестве топлива для моторвагонного подвижного состава в Украине. Проведён анализ подвижного состава с его применением в Японии и Германии. Рассмотрены топливно-экономические показатели*

эксплуатации мотор-вагонного подвижного состава в Украине на данный момент с использованием протон-обменных мембранных топливных элементов на этом подвижном составе, проведено сравнение и анализ полученных данных. Разработана модель оценки подвижного состава на водородном топливе и определен наиболее эффективный подвижной состав для модернизации с использованием протон-обменных мембранных топливных элементов. Предварительно определено необходимое оборудование для модернизации, разработана схема размещения оборудования на подвижном составе.

**Ключевые слова:** водородное топливо, модернизация, дизель-поезд, топливные элементы, полимер обменная мембрана, расход топлива.

**Formulation of the problem.** Railway transport provide about 50 % of all transportation in Ukraine [1]. Most of the rolling stock in Ukraine is now lagging behind the worldwide technical progress for several decades (operated rolling stock and technologies of its repairing, to a greater extent, belong to second generation, and they are morally obsolete. In Ukraine most of science researches, in general, focused on developing technologies, most of each aimed on solution of the problems, related to the extension of service life of now operated rolling stock. Also, is being conducted developing and production new, modern rolling stock on Ukrainian factories, including rolling stock for high-speed operation. As an example, Ukrainian manufacturer "Kryukov Rail Car Building Plant" designed and produced electric train EKr-1, named "Tarpan", with a maximum allowable speed of operating 220 km/h [2]. But at the moment, maximum allowable speed of operating on Ukrainian railroads is 160 km/h, the reason is that existing railway track does not allow operate rolling stock with higher speeds.

In view of the world trend of increasing the speed of passenger rail transport and make it zero emission, for Ukraine becomes relevant the question of its own high-speed and zero emission operations. To operate railway rolling stock with speeds higher 200 km/h, railway track should be built from zero (which is corresponding to the norms of operation), this entails a number of financial costs. According to Private Joint Stock Company "Ukrzaliznytsya" strategy presentation till 2021, dated September 12, 2017, Ukraine is

planning spend 5.9 billion USD of capital investment for railway development, from which 4 billion is for the renewal of rolling stock [3].

One of solution could be using, on traction rolling stock with the hybrid power transmission, proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). As well, known as polymer electrolyte membrane fuel cells (PEM). That will reduce fuel costs, the level of environmental pollution and noise pollution. From our point of view, it is the most perspective topic for railway rolling stock development for next 15-20 years. This topic will be relevant until the moment when will be created power storage which could provide enough power for rolling stock operation, without frequent re-charging, and at the cost-effective price. Therefore, consideration of using hydrogen as a fuel on multiple units rolling stock currently is relevant and timely objective.

**Purpose and objectives of research.** The main objective of this research is the technical and economic improvement of the operational index of the railcar rolling stock by modernizing it replacing the power plant (diesel ICE) with polymer electrolyte membrane fuel cells. To solve the set goals, the following tasks are considered:

- Review experience of using hydrogen as fuel on traction rolling stock in other countries;
- Determination of the most efficient use of hydrogen as a fuel;
- Analysis of scientific research and testing of rolling stock with PEMFC;

- Consideration methods of obtaining, transporting, storing of hydrogen and the operation of PEMFC;
- Comparing the indicators of fuel efficiency on the rolling stock in operation with its modernization and the definition of its rating;
- Development of the basic scheme of rolling stock operation during its modernization with PEMFC.

The object of the research is: determination of multiple units rolling stock fuel efficiency index, when it is modernized with replacement power plant (diesel ICE) with PEMFC.

**Overall information about using hydrogen fuel on railway transport.** Today exists two variants for using hydrogen as a fuel on railway transport.

- Using hydrogen as a fuel for internal combustion engines. In this case expediently applying hybrid power transfer circuit, when

the power point producing electricity, which flows to batteries and then, with the help of smart allocation system of energy, flows to various units of rolling stock [4];

- Installation on rolling stock fuel cell, whose operating principle based on electrolysis (more precisely on its reverse process). This variant more effectively could work with hybrid power transfer circuit (with batteries and smart allocation system of energy) [5, 6].

One of the first tractive rolling stock, which powers with hydrogen fuel, built scientists from Tokyo Railway Research Institute (Japan) in 2001. K. Ogawa, T. Yamamoto, T. Yoneyama in the period from 2001 to 2005 year tested, by that moment first in the world, rolling stock with PEMFC. Rolling stock weight, including auxiliary equipment, was 35.3 tons. According to [5] research was conducted by two schemas of power transfer circuit (fig. 1).

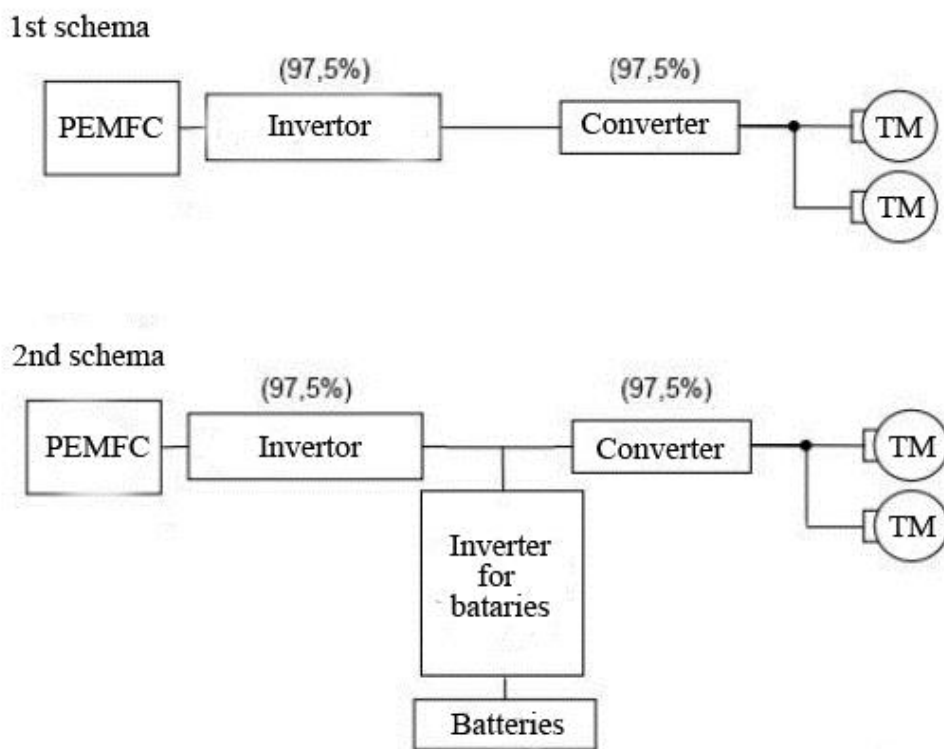


Fig. 1. Schemes of power transmission of a locomotive using hydrogen fuel

First schema: PEMFC (with max output power 120 kW) - Converter - Inverter - Traction motors. According to the results of tests mid index of efficiency was equal 56.3 %, and fuel consumption was 11.3 km/kg.

Second schema: PEMFC (with max output power 120 kW) - Converter - Li-Ion batteries - Inverter - Traction motors.

If in first schema electricity flow almost directly from PEMFC to traction motors, then with this power transfer scheme PEMFC charging Li-Ion batteries, then it flows to traction motors. Likewise, during tests of this schema were used regenerative braking, down to 5 km/h, then electro-pneumatic brakes.

According to the results of tests mid index of efficiency was equal 75.7 %, and fuel consumption was 16.1 km/kg [5].

In 2016 French company Alstom represent, on "Innotrans 2016", prototype of commuter train which runs on hydrogen fuel. Coradia iLint designed and built on Lint 54 base, by Alstom in common with German center of Aerospace Industry (project name "Bethy"). Hydrogen is converting into electrical energy in PEMFC and runs traction motors. Hydrogen stored in 2 tanks by 90 kg each on the roof of rolling stock. On every rolling stock established 2 PEMFC, with power 200 kW each. PEMFC are supplied by Canadian manufacturer "Hydrogenics", between "Alstom" and "Hydrogenics" was signed a contract according to it "Alstom" will receive at least 200 PEMFC in next 10 years, sum in the contract (excluding repairing and service) amounted to 50 million euro. Drive unit provide starting pulling force 87 kN and power 544 kW. Other spare parts are used similarly to the current diesel version. As batteries installed 110 kWh Li-Ion accumulators, placed under the salon of rolling stock. The energy recovery system is also used on this rolling stock. At full refueling of fuel tanks travel distance of Coradia iLint is between 600 and 800 km, from which follows, that fuel consumption variable 6.667 - 8.889 km/kg, with a maximum speed of movement 140 km/h. Alstom planning use hydrogen to

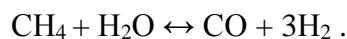
refuel trains from Industriepark Höchst (one of the biggest chemical and pharmacy factory in Europe), where hydrogen is a by-product [6, 7].

#### Overall information about hydrogen.

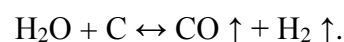
Hydrogen is the most common chemical element in the universe. The hydrogen gas has no taste, no color, no smell and it's not toxic. At certain concentrations and interaction with the oxygen in the environment - explosive. Has a specific heat of combustion of 120 (lower threshold) - 140 (higher threshold) MJ/kg (for comparison, the specific heat of combustion of natural gas=50 MJ/kg, propane-butane =36 MJ/kg, gasoline (92) = 42-44 MJ/kg, diesel = 42.7 MJ/kg) [8].

Hydrogen is produced both on an industrial scale and on a laboratory scale. In the industry to date, the following methods of obtaining hydrogen have been widely used:

1. Conversion (process of processing of gases for the purpose of changing the composition of the initial gas mixture) of natural gas or methane with steam at a temperature of 800 to 1300 °C. In this way, more than half of all hydrogen used in the world is produced. Although this method is currently the most popular, it still remains not environmentally friendly. According to the formula below, we can see that along with hydrogen in the ratio  $\frac{1}{3}$ , a CO is formed, which must be disposed of, which ultimately affects not only the ecology of the environment, but also the cost of produced hydrogen.



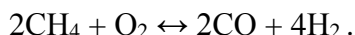
2. Transmission of water vapor over the heated coke at a temperature of about 1000 °C, without access to oxygen.



3. Electrolysis of aqueous solutions of salts, transmission of electric current:



4. Catalytic oxidation of hydrocarbons with oxygen:



5. Cracking and reforming are also used.

6. In 2007, a group of scientists from the UK published their research on the production of hydrogen in the decomposition of organic waste. According to their calculations, when decomposing organic waste, it is possible to collect hydrogen of grade A. By an approximate calculation from the organic waste of only London, 67 to 141 tons of hydrogen can be daily produced.

7. Production of hydrogen as a by-product from the pharmaceutical industry [9].

The cost of produced hydrogen depends on the method of its production and is in the range from \$ 1 to \$ 7 per kilogram. It is also very important to note that liquefied hydrogen must be stored under special conditions. Scientists from the USA developed special cryogenic tanks (cylinders, tanker) for safe and economically profitable storage and transportation of liquefied gases [10].

The next questions that arise are the volume of liquefied gas, its weight and cost in Ukraine. The weight of one liter of liquefied hydrogen is 70.99 g (0.07099 kg). At the retail price of a 40-liter gas cylinder at 500 hryvnias (~ \$ 18.88) as of the NBU exchange rate for 16-11-2017, the cost of 1 liter of hydrogen is 12.5 hryvnia (~ \$ 0.472), and the cost of 1 kilogram of hydrogen is therefore 176.08 hryvnia (~ \$ 6.85). In a more detailed study of this market, it is likely that with wholesale purchases, the price of hydrogen will be much lower [11-13].

To store liquid hydrogen, it is necessary to use storage with efficient thermal insulation. For long-term storage and also when transporting liquid hydrogen, in order to minimize losses from evaporation, it is recommended that it be maintained in a supercooled state. The use of multi-layer insulation on cryogenic equipment, in the USA, has shown that it is one of the most important conditions for the safe long-term storage and transportation of liquid hydrogen

in large quantities. Tests were carried out on a transport tank with a capacity of about 107,000 liters, with an insulation thickness of 28.757 millimeters, evaporation losses were only 0.25 % per day, including losses from heat influx on the supports. Currently, such tanks, with a capacity of 96,200 liters, are widely used for transporting liquid hydrogen in the United States, with total losses less than 10 % of the mass of the liquid product per year [14-17].

Consider the principle of operation and the use of proton-exchange membrane fuel cells, they are a type of fuel cells that are used mainly for transport applications, as well as for stationary and portable applications. Their distinguishing features are lower temperature ranges (from 50°C to 100°C), pressures and a special proton conductive polymer electrolyte membrane. PEMTE generate electricity and operate on the principle of the opposite electrolysis. They are the main candidate for replacing the aging alkaline fuel cell technology, which is widely used to date all around the world.

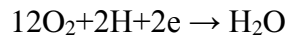
PEMFC consists of membrane electrode assemblies (MEAs). They represent a collected stack of proton exchange membranes or ion-exchange membranes, catalyst and a flat electrode plate used in fuel cells and electroliers. The main part of the cell is the triple phase boundary, where the electrolyte, catalyst and reagents are mixed and, therefore, where the reaction takes place. It is important to note that the membrane should not be electrically conductive, it is necessary to prevent mixing of reactions. Operating temperatures, preferably, should be above 100 °C, so that the by-product - water becomes steam, and water management becomes less critical in the design of the cell.

Let's have a look at reactions inside fuel cells. The hydrogen stream is fed to the anode side of the PEMFC. On the anode side, it is catalytically split into protons and electrons. Hydrogen oxidation reaction at the anode represented below:



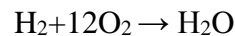
$$E' = 0 \text{ V } dE'dT=0\text{mVK}^{-1} .$$

Formed protons penetrate the membrane of the polymer electrolyte on the side of the cathode. Electrons, in turn, move along the external load circuit also to the cathode side, thus creating an electric current at the outlet of the fuel cell. Meanwhile, the flow of oxygen flows directly to the cathode side. On the cathode side, oxygen molecules react with protons that have passed through the membrane of the polymer electrolyte from the side of the anode, and electrons coming through the outer chain, forming water molecules. The oxygen reduction reaction at the cathode is shown below:



$$E' = 1.2291 \text{ V } dE'dT= -0.8456 \text{ mVK}^{-1} .$$

Proceeding from this, the general reaction is as follows:



$$E' = 1.2291 \text{ V } dE'dT= -0.8456 \text{ mVK}^{-1} .$$

The reversible reaction is expressed in equations and shows the reincorporation of hydrogen protons and electrons together with the oxygen molecule and the formation of one water molecule. Potentials in each case are given with respect to the standard hydrogen electrode (fig. 2).

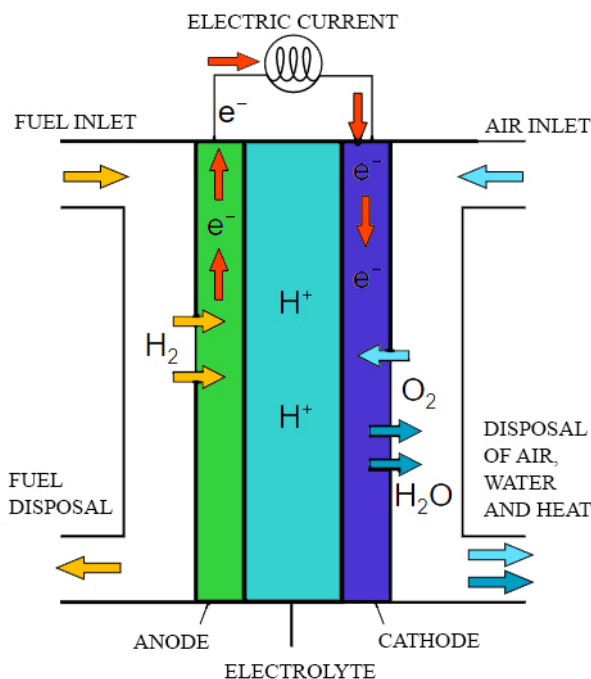


Fig. 2. Schematic diagram of the operation of a polymer electrolyte membrane fuel cell

On the basis of PEMFC, so-called hydrogen generators of different power are produced, from 1 kW to 4.6 MW, they have found their application in various industries. One of the leaders in the production of such systems is the previously mentioned company "Hydrogenics" (Mississauga, Canada) [18].

### Using PEMFC on traction rolling stock in Ukraine

#### Comparison of fuel-economy indexes on operated rolling stock in Ukraine.

Currently to compare different types of rolling stock, basically use two approaches. First directed to compare rolling stock cost of life

cycle, and mainly used for already designed new project or modernized rolling stock [19]. Second approach based on qualimetrics approaches and used on early stages of choosing type of rolling stock or type of its modernization. Main idea of this approach is in calculation of the technical level factor or other criteria and comparing under consideration types of rolling stock chosen by criteria [20]. In our case was chosen second approach.

To evaluate the rolling stock before and after modernization, a criterion was proposed that shows the cost of fuel, which is necessary for transportation of one passenger per one kilometer, expressed in moneyed equivalent.

$$CT_{p/km} = \frac{BSFC \cdot FC \cdot EP \cdot C}{AS};$$

where BSFC – brake specific fuel consumption,  $\frac{g}{HP \cdot h (kWh)}$ ;

FC – fuel cost, uah / kg;

EP – engine power, HP (kW);

C – vauxiliary coefficient for converting the received value into UAH / pass \* km;

AS – number of seats in rolling stock.

This approach was implemented in a subprogram on choosing the type of multiple units rolling stock rolling stock for transferring it to hydrogen fuel, which is included in the overall program for assessing the quality of rolling stock [20].

To ensure the possibility of using this criterion speed was chosen constant and equal 60 km per hour. The following prices were accepted for calculations: 28,67 UAH/kg for diesel and 1,77 UAH/kWh for electricity. [21-22] Brake specific fuel consumption, electricity and other needed data for calculations were accepted according to technical specifications of multiple units rolling stock rolling stock [23-34]. Specific hydrogen consumption and needed power of PEMFC for modernizations accepted

according to the analysis of the “Alstom” company reports [7, 35].

Calculations were made for multiple units rolling stock rolling stock, which is operated on the Ukrainian railways: DR1A, D1, DPL1, DPL2, DTL1, DTL2, 620M, 630M, DPKr2, ER2, EPL2, ED4, ET2, ER9M, EPL9T, ED9M. The results of calculations are presented in table 1.

The results of comparison showed, that the cost of fuel, when replacing the power plant by PEMFC on diesel powered trains decreases on about 60 %, but on trains which runs by electricity, increase on 159.9 %. Consequently, a cost-effective to use PEMFC on diesel trains. When choosing a prospective rolling stock to continue research work, taken into account indexes of rolling stock remaining service life. For further work chosen diesel train DPKr2, today in Ukraine only one such a train is operating. That means, that to place on it PEMFC it is necessary to build new rolling stock, with initially installed PEMFC on it (fig. 3).

To use hydrogen power plant on the rolling stock preliminarily needed next equipment:

- PEMFC HD series, power 200 kW, produced by “Hydrogenics”;
- Cryogenic fuel tanks, to storage hydrogen under the pressure 70 MPa, with volume 1300-1500 liters;
- Li-Ion batteries ~ 220 kW;
- Bogies (TMF 59-38-4) with traction motors.

### Conclusions:

1. The experience of using hydrogen as a fuel on a rolling stock is considered. According to fuel-economy indexes chosen PEMFC as a power plant. As well using PEMFC increase number of moving parts inside power plant, what will decline wear and tear and will make repairing much easier during rolling stock operation.



Table 1

Indexes of efficiency of using hydrogen as a fuel on multiple units rolling stock rolling stock

Serial of rolling stock	DR1A	D1	DPL1	DPL2	DTL1	DTL2	620M	630M	DPK+2	ER2	EPL2	ED4	ET2	ER9M	EPL9T	ED9M
Diesel price, uah/kg	28,67															
The cost of diesel fuel for the transportation of 1 passenger per 1 km, uah	0,257	0,215	0,301	0,456	0,294	0,327	0,363	0,354	0,429	0,123	0,027	0,127	0,252	0,106	0,107	0,121
Brake specific fuel consumption of ICE, g/hp*h	170,0	168,0	160,0	158,5	160,0	158,5	140,0	140,0	163,45	4400	960	4700	4800	3640	3520	4400
Engine power, hp	2001	1074	2000	3060	2000	2250	516	1033	1591	1050	1040	1088	560	1010	968	1068
Number of seats, pieces	632	400	508	508	520	520	95	195	289							
Brake specific fuel consumption of PEMFC, g/hp*h	28,01															
Liquid hydrogen price, uah/kg	120,6															
Needed power of PEMFC, hp	1026	551	1026	1569	1026	1154	265	530	816							
The cost of hydrogen fuel for the transportation of 1 passenger per 1 km, uah	0,091	0,077	0,113	0,173	0,111	0,124	0,156	0,152	0,1589	0,320	0,070	0,330	0,656	0,276	0,278	0,315
Delta of expenses, uah / %	0,165	0,138	0,187	0,282	0,183	0,202	0,206	0,201	0,271	0,197	0,043	0,203	0,403	0,169	0,171	0,194
	64,46	64,03	62,24	61,88	62,24	61,88	56,84	56,84	63,03	-159,9	-159,9	-159,9	-159,9	-159,9	-159,9	-159,9

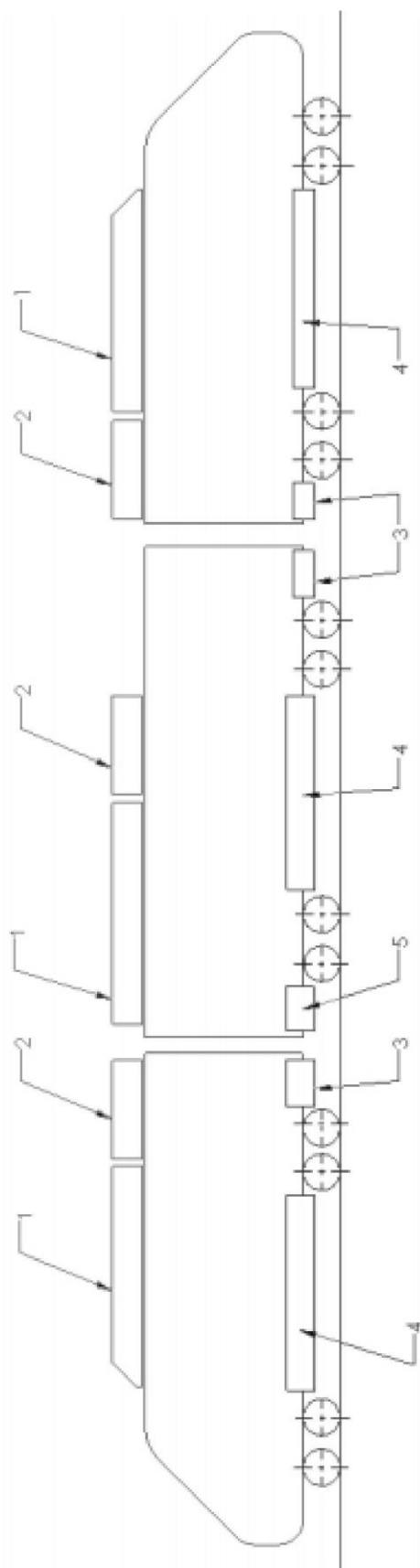


Fig. 3. Location equipment on a multiple units rolling stock with hydrogen fuel.  
1 – Fuel tank; 2 – PEMFC; 3 – Inverter for traction motors; 4 – Li-Ion batteries; 5 – Inverter for indoor needs

2. The main methods of hydrogen production are determined; the average cost of liquefied hydrogen is taken equal to 120.6 UAH / kg. The fuel and economic indicators of the operated passenger rolling stock are compared. Comparison of cost indices for transportation of passengers using diesel, electric and hydrogen traction is made. It was preliminary concluded that it is economically feasible to use PEMTE as a power plant on diesel trains, taking into account the wear and tear during operation of rolling stock with PEMFC, the diesel train DPKr2 was chosen, after fuel cells are installed, the fuel costs will decrease by 63.03 %.

3. A scheme for locating equipment on rolling stock is proposed. The main technical parameters of the equipment for installation are determined.

4. In addition to saving fuel, the traction rolling stock will be absolutely environmentally friendly, because the by-product of the PEMFC operation is water (which can be used in itself needs), производство топлива возможно без выброса вредных веществ в атмосферу. Such a rolling stock is about 2 times quieter than similar diesel train.

5. In subsequent work, it is necessary to develop systems using PEMFC on a diesel train DPKr2, conduct rolling stock tests with PEMFC, simulate the operation of such rolling stock, calculate the payback period, design the logistics of production and supply of hydrogen to the points of refueling in the conditions of Ukraine.

#### *List of used sources*

1. Presentation: Hydrogen Rail Test Projects in Germany, Dr.-Ing. Ulrich Bünger [Electronic resource]: [2017]. URL: [https://hydrail.appstate.edu/sites/hydrail.appstate.edu/files/12\\_bunger.pdf](https://hydrail.appstate.edu/sites/hydrail.appstate.edu/files/12_bunger.pdf), 30 p.; (data zvernennya: 16.11.2017).

2. Kryukovskiy Vagonostroitelnyiy Zavod [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupa : <http://www.kvsz.com>. – (data zvernennya: 16.11.2017).

3. Za strategiyu rozvitku UkrzaliznitsI do 2021 roku vklyuchno planuemo 5,9 mlrd dol. SShA kapitalnih investitsiy, z yakih blizko 4 mlrd dol. SShA, – na onovlennya ruhomogo skladu [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupa : [http://www.uz.gov.ua/press\\_center/up\\_to\\_date\\_topic/page-31/458113/](http://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/page-31/458113/). – (data zvernennya: 17.11.2017).

4. Article: Railpower GG20B [Electronic resource]: [2010] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Railpower\\_GG20B#Fuel\\_Cell\\_Testbed](https://en.wikipedia.org/wiki/Railpower_GG20B#Fuel_Cell_Testbed) (date of the application 20.11.2017).

5. Hydrogenics corporate presentation & Renewable Hydrogen Activities [Electronic resource]: [May 2016] URL: <https://www.slideshare.net/DenisThomas1/201605hydrogenicscompany-presentationcompressed> (date of the application 16.11.2017).

6. Article: How a Fuel Cell Works [Electronic resource]: [2016] URL: <http://www.proton-motor.com/how-a-fuel-cell-works/> (date of the application 17.11.2017).

7. Alstom Coradia Lint [Internet resource]: [2016] URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Alstom\\_Coradia\\_LINT#iLint](https://de.wikipedia.org/wiki/Alstom_Coradia_LINT#iLint) (date of the application 16/11/2017).

8. Volodarets, M. V. Udoskonalennya metodiv ta modeley viznachennya tekhnoekonomichnih pokaznikiv gIbridnih lokomotiviv [Tekst] : avtoref. / Volodarets Mykyta Vitalijovych. – Kharkov, 2016. – 20 s.

9. Article: Hydrogen [Electronic resource]: [2017] URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen> (date of the application 20.11.2017).

10. Sposobyi polucheniya vodoroda: [Elektronniy resurs] : statya. – Rezhim dostupa : <http://energokeeper.com/sposobyi-polucheniya-vodoroda.html>. – (Data obrascheniya 16.11.2017).

11. Proizvodstvo vodoroda [Elektronnyiy resurs]: statya. – Rezhim dostupa : [https://ru.wikipedia.org/wiki/Proizvodstvo\\_vodoroda](https://ru.wikipedia.org/wiki/Proizvodstvo_vodoroda). – (Data obrascheniya 20.11.2017).
12. Prays-list / OOO "Kriotehgaz UPK". [Elektronnyiy resurs] : – Rezhim dostupa : <https://kriotehgaz.com.ua/prajs-list/>. – (Data obrascheniya: 16.11.2017).
13. Kurs grivnyi po sostoyaniyu na tekuschiy den [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa <https://minfin.com.ua/currency/usd/>. – (Data obrascheniya 16.11.2017).
14. Energy efficiency and fuel consumption of fuel cells powered test railway vehicle K. Ogawa, T. Yamamoto, T. Yoneyama Railway Technical Research Institute, TOKYO, JAPAN [Electronic resource]: [2007] URL: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/ps.2.26.pdf> (data zvernennya 16.11.2017).
15. Hranenie i transportirovka zhidkogo vodoroda [Elektronnyiy resurs]. Rezhim dostupa <http://chem21.info/info/1472019/>. – (data zvernennya 16.11.2017).
16. Article: Hydrogen storage [Electronic resource]: [2017] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_storage](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_storage) (data zvernennya 20.11.2017).
17. Kriogennyie tsisternyi konteynernno-karkasnogo ispolneniya [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa <http://www.xn--80affk5ct.xn--p1ai/kriogeniy-intermodaliy-rezervuar.html>. – (data zvernennya 20.11.2017).
18. Gladyisheva M.A. Vodorodnaya energetika. Hranenie vodoroda., MFTI, [Elektronnyiy resurs] / M.A. Gladyisheva. – Rezhim dostupa: [http://www.abitura.com/modern\\_physics/hydro\\_energy/hydro\\_energy4](http://www.abitura.com/modern_physics/hydro_energy/hydro_energy4). – Zagl. s ekrana. – (Data obrascheniya 21.11.2017).
19. Tartakovskiy, E. D. Otsenka zhiznennogo tsikla [Tekst] / E. D. Tartakovskiy, A. P. Falendysh, Yu.E. Kalabuhin, S.G. Grischenko. // Lokomotiv-inform: nauchnyiy zhurnal. 2013. -#2 (80). – S. 56-60.
20. Falendysh, A. P. Programniy kompleks viboru sistemi tehlichnoyi ekspluatatsiyi manevrovogo teplovozu [tekst] / A.P. Falendysh, A.L. Sumtsov, O.V. Artemenko // Informatsiynokeruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti. 2016. -#1. – S.54-61.
21. Article: Proton exchange membrane fuel cell [Electronic resource]: [2017]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Proton-exchange\\_membrane\\_fuel\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Proton-exchange_membrane_fuel_cell) (date of the application 21.11.2017).
22. Torgi na zakupivlyu 60 tis. tonn dizelnogo palnogo ogolosili za onovlenoyu formuloyu [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: [http://www.uz.gov.ua/press\\_center/up\\_to\\_date\\_topic/page-3/462742/&sa=D&ust=1512562999659000&usg=AFQjCNERt-TVmJal8HO-iZyb\\_f-jsMd0g](http://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/page-3/462742/&sa=D&ust=1512562999659000&usg=AFQjCNERt-TVmJal8HO-iZyb_f-jsMd0g). – (Data zvernennya 22.11.2017).
23. Informatsiya schodo rozdrbnih tarifiv na elektrichnu energiyu, scho vldpuskaetsya dlya kozhnogo klasu spozhivachiv, krIm naselennya, na teritoriyi UkraYini, na gruden 2017 roku [Elektronnyiy resurs] : Informatsiya / natsionalna komisiya, scho zdIysnyuE derzhavne regulyvannya u sferah energetiki ta komunalnih poslug (NKREKP). – Rezhim dostupa: <https://www.nerc.gov.ua/?id=29658>. – (Data zvernennya 22.11.2017).
24. DR1A [Elektronnyiy resurs]: statya. – Rezhim dostupa: <https://ru.wikipedia.org/wiki/DR1A> (Data obrascheniya: 23.11.2017).
25. Vsyo pro dizel-poezd DR1P i DR1A [Elektronnyiy resurs]: statya. – Rezhim dostupa: <http://www.ipukr.com/?p=8465>. – (Data obrascheniya: 22.11.2017).
26. DPL1 [Elektronnyiy resurs]: statya. – Rezhim dostupa: <https://wikipedia.org/wiki/DPL1>. – (Data obrascheniya: 23.11.2017).
27. Dizel-poezda D1 [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: [http://www.poezdvl.com/books/rakov/rakov1\\_35.html](http://www.poezdvl.com/books/rakov/rakov1_35.html). – (Data obrascheniya: 22.11.2017).
28. Teplovoz M62 ustroystvo dizelya i ego tehnicheskaya harakteristika [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: [http://dieselloc.ru/m62/m62\\_3.html](http://dieselloc.ru/m62/m62_3.html) (Data obrascheniya: 22.11.2017).

29. Istoriya 2TE116 [Elektronnyiy resurs]: Statya. – Rezhim dostupa: [https://rzd-expo.ru/history/istoriya\\_2TE116/&sa=D&ust=1512562999655000&usg=AFQjCNHWVSFqFitU6VkyCQlejF9Pz29UWg](https://rzd-expo.ru/history/istoriya_2TE116/&sa=D&ust=1512562999655000&usg=AFQjCNHWVSFqFitU6VkyCQlejF9Pz29UWg). – (Data obrascheniya: 22.11.2017).
30. Tsukalo, P. V., Eroshkin N. G. Elektropoezda ER2 i ER2R [Tekst] / P. V. Tsukalo, N. G. Eroshkin // Transport. – M.:, 1986 – S. 359.
31. Elektropoezda serii ET2 [Elektronnyiy resurs]: Statya. – Rezhim dostupa: <http://poezdon.ru/poezda/elektropoezda/elektropoezda-serii-et2>. – (Data obrascheniya: 23.11.2017).
32. ER9 [Elektronnyiy resurs]: Statya. – Rezhim dostupa: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ER9>. – (Data obrascheniya 23.11.2017);
33. Elektropoezd ER9M. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Tekst]. – M. : Transport, 1978. – 328 s.
34. Elektropoezd EPL9T Rukovodstvo po ekspluatatsii Chast 1 Opisanie i rabota [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: [http://static.scbist.com/scb/uploaded/1\\_1387332020.pdf](http://static.scbist.com/scb/uploaded/1_1387332020.pdf).
35. Presentation: Hydrogen and Fuel Cells in Passenger Rail Transit, Mark Kammerer, on behalf of Michael Ritter [2017]. URL: [https://hydrail.appstate.edu/sites/hydrail.appstate.edu/files/12\\_ritter.pdf](https://hydrail.appstate.edu/sites/hydrail.appstate.edu/files/12_ritter.pdf).

---

Falendysh Anatoly Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Heat Engineering and Heat Engines of the Ukrainian State University of Railway Transport. Тел. (057) 730-10-77.  
E-mail.: [far\\_hiit@ukr.net](mailto:far_hiit@ukr.net).

Chigiry Natali Dmitrievna, Ph.D., Associate Professor, Department of Operation and Repair of Rolling Stock of the Ukrainian State University of Railway Transport. Тел. (057) 730-19-99. E-mail.: [natalia65@ukr.net](mailto:natalia65@ukr.net).

Kosarev Oleg Igorovich, master's student of the department of operation and repair of rolling stock of the Ukrainian State University of Railway Transport. Тел. (057) 730-19-99. E-mail.: [kosariev.oleg@gmail.com](mailto:kosariev.oleg@gmail.com).

Фалендиш Анатолій Петрович, доктор технічних наук, професор, завідувачий кафедрою теплотехніки та теплових двигунів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-77.  
E-mail.: [far\\_hiit@ukr.net](mailto:far_hiit@ukr.net).

Чигирик Наталія Дмитрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-19-99.  
E-mail.: [natalia65@ukr.net](mailto:natalia65@ukr.net).

Косарев Олег Ігорович, магістрант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-19-99. E-mail.: [kosariev.oleg@gmail.com](mailto:kosariev.oleg@gmail.com).

Фалендыш Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (057) 730-10-77. E-mail.: [far\\_hiit@ukr.net](mailto:far_hiit@ukr.net).

Чигирик Наталия Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и ремонта подвижного состава Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (057) 730-19-99. E-mail.: [natalia65@ukr.net](mailto:natalia65@ukr.net).

Косарев Олег Игоревич, магистрант кафедры эксплуатации и ремонта подвижного состава Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (057) 730-19-99.  
E-mail.: [kosariev.oleg@gmail.com](mailto:kosariev.oleg@gmail.com).

Статтю прийнято 14.02.2018 р.

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)**

---

УДК 656.223

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СЕРВІСНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПАСАЖИРІВ НА СТАНЦІЇ В УМОВАХ ШВИДКІСНОГО РУХУ**

Д-р техн. наук Д. В. Ломотко, магістрант Є. Ю. Лебедь

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАССАЖИРОВ НА СТАНЦИИ В УСЛОВИЯХ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ**

Д-р техн. наук Д. В. Ломотко, магістрант Е. Ю. Лебедь

**IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF PASSENGER SERVICE AT THE STATION IN CONDITIONS OF HIGH-SPEED LINES**

Doct. of techn. Sciences D. Lomotko, master E. Lebed'

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127041

---

*Представлено основні напрямки удосконалення системи сервісного обслуговування пасажирів. Показано ефект від створення рентабельної комплексної транспортної системи обслуговування пасажирів в умовах швидкісного залізничного руху. Встановлено, що для вокзалів, які розташовані на лініях швидкісного залізничного транспорту, необхідно враховувати додаткові вимоги до сервісного обслуговування – особливість планувальних рішень у комерційних зонах вокзалів, наявність і місце розташування сервіс-центру, наявність засобів для надання комплексних послуг. Для економічної оцінки ефективності системи сервісного обслуговування пасажирів запропоновано скористатись методом виявлення точки беззбитковості.*

**Ключові слова:** швидкісний залізничний транспорт, сервіс пасажирських перевезень, вокзал, інфраструктурний комплекс, пряме залізничне сполучення.

*Представлены основные направления совершенствования системы сервисного обслуживания пассажиров. Показано эффект от создания рентабельной комплексной транспортной системы обслуживания пассажиров в условиях скоростного железнодорожного движения. Установлено, что для вокзалов, расположенных на линиях скоростного железнодорожного транспорта, необходимо учитывать дополнительные требования к сервисному обслуживанию – особенность планировочных решений в коммерческих зонах вокзалов, наличие и размещение сервис-центра, наличие средств для оказания комплексных услуг. Для экономической оценки эффективности системы сервисного обслуживания пассажиров предложено воспользоваться методом выявления точки безубыточности.*

**Ключевые слова:** скоростной железнодорожный транспорт, сервис пассажирских перевозок, вокзал, инфраструктурный комплекс, прямое железнодорожное сообщение.

*The main directions of improving the system of passenger service are presented. The effect of creating a profitable complex transport system for passenger services in conditions of high-speed railway traffic is shown. The basic directions of development of service of passenger transportations in transport nodes are revealed - development of intelligent transport systems;*

*integration of solutions in the field of uniform travel documents, increase of shipping and bandwidth. It is established that for stations located on the lines of high-speed rail transport, it is necessary to take into account additional requirements for service - a feature of planning solutions in the commercial zones of stations, the availability and location of the service center, the availability of facilities for providing comprehensive services. It is proved that the level of service and the volume of the provided services mainly depends on the level of satisfaction of passengers, the profitability of additional types of services and the income of commercial zones of the station. For the economic evaluation of the efficiency of the passenger service system, it is proposed to use an estimate of the cost of servicing 1 passenger at the station in order to identify the break-even point.*

**Key words:** *high-speed rail transport, passenger transportation service, railway station, infrastructure complex, through railway service.*

**Вступ.** В умовах ринкової економіки посилюється конкурентна боротьба між різними видами транспорту за залучення пасажиропотоку. При цьому визначальним чинником у виборі способу пересування стає рівень якості транспортного обслуговування населення. Важлива роль в підвищенні якості пасажирських перевезень і рівня культури обслуговування пасажирів відводиться роботі вокзалів. З'являються залізничні вокзали, об'єднані з іншими перевізниками, наприклад поряд з вокзалом станції, що розглядається, знаходиться автостанція. Завданням вітчизняного пасажирського залізничного транспорту є найбільш повне задоволення потреб населення в перевезеннях. Сьогодні ПАТ "Укрзалізниця" об'єднує шість регіональних філій-залізниць і близько 140 інших структурних підприємств. На частку ПАТ "Укрзалізниця" припадає близько 38 % пасажирських перевезень в Україні. Однією з найважливіших проблем великих міст країни є необхідність модернізації і формування нової структури залізничної транспортної мережі шляхом впровадження швидкісного та високошвидкісного залізничного руху. Формування попиту на послуги з перевезень пасажирів безпосередньо пов'язано з розвитком транспортно-пересадочних вузлів (ТПВ), вокзалів і з організацією сервісного обслуговування пасажирів на них.

Найбільш повне задоволення потреб населення є одним із головних викликів, що

постає перед ПАТ "Укрзалізниця". Незважаючи на постійне вдосконалення технології у сфері пасажирських перевезень, для великих міст та обласних центрів у транспортних вузлах визначається недосконалість сервісу пасажирських перевезень. Наприклад, характерним є тривалість знаходження пасажира на вокзалі від 35 до 90 хвилин. За рахунок надання додаткових послуг пасажиру за цей час можливо підвищити рівень його задоволеності обслуговуванням, що у свою чергу збільшить обсяги та рентабельність додаткових видів послуг, а також дохід комерційних зон вокзалу [1].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Дослідження показують, що час перебування пасажира в ТПВ та на вокзалах у вітчизняних умовах може становити до чверті загального часу переміщення [2].

Наукові дослідження у сфері функціонування ТПВ та вокзалів свідчать, що система надання сервісних послуг на них не в повному обсязі враховує специфіку ринкової економіки та умови реформування галузі [1, 9]. Реалії вітчизняної галузі свідчать про можливість використання закордонного досвіду організації швидкісного руху, формування та проектування ТПВ [3], особливо в умовах взаємодії з міським, приміським, автомобільним та повітряним видами пасажирського транспорту [5]. Проблемні питання функціонування, формування і розвитку сервісу на ТПВ та вокзалах стали більш

актуальними у зв'язку зі зростанням мережі швидкісних залізничних перевезень [8, 10].

Для формування заходів щодо уникнення незручностей при пересуванні та з метою скорочення часу перебування пасажирів на ТПВ і вокзалах здійснюють удосконалення шляхів прямування пасажиропотоків під час пересадки або при очікуванні [4], що дозволяє враховувати особливості мультимодальної технології доставки пасажирів з використанням «єдиного» квитка [11]. Виходячи з глобальної мети планування та узгодження руху пасажирського транспорту виникає необхідність використання сучасних методів нечітких множин для прогнозування, моделювання динаміки та опису взаємодії пасажиропотоків у ТПВ, практичне застосування отриманих підходів на залізницях є вкрай обмеженим [6,10].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є удос-

коналення технології та визначення необхідного рівня сервісу на ТПВ та вокзалах. Це запропоновано здійснити шляхом виявлення основних напрямків розвитку сервісу пасажирських перевезень в умовах швидкісного руху з оцінюванням ефективності системи сервісного обслуговування і визначенням точки беззбитковості.

**Основна частина.** Об'єктом дослідження обрано вокзал, специфікою якого є розташування на швидкісній лінії з обслуговуванням масового потоку транзитних пасажирів на напрямках Донбас – Київ, Київ – Одеса, Харків – Львів, а також наявність значного потоку пасажирів свого відправлення в прямому, місцевому та приміському сполученнях різних напрямків. Розподіл кількості пасажирів, пас/доба, вокзалу по основних містах держави наведено на рис. 1.

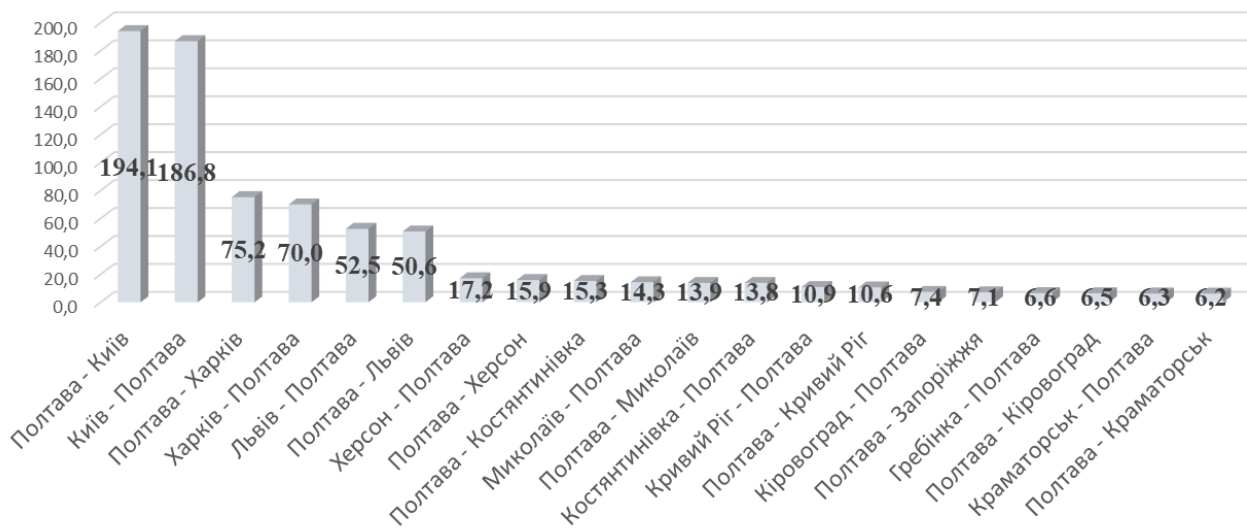


Рис. 1. Розподіл кількості пасажирів вокзалу станції по основних містах держави

Вокзал за обсягом роботи і загальною площею вокзальних приміщень належить до третього класу і являє собою комплекс приміщень і споруд, призначених для обслуговування пасажирів. У нього входить привокзальна площа, будівля вокзалу, перон, посадкові платформи з пішохідними

містками та пішохідним мостом, автоматичні камери схову та інші споруди.

Послуги, що надаються пасажирам на вокзалі станції, групуються так: профільні і непрофільні; специфічні і неспецифічні.

Профільними є послуги, які безпосередньо пов'язані з перевезенням пасажирів залізницею. До них слід віднести



перевезення пасажирів; перевезення ручної поклажі. До непрофільних послуг відносять платні послуги, які не пов'язані з перевезенням пасажирів.

Специфічними вважаються послуги, які надаються лише на залізничному транспорті (продаж і оформлення проїзних документів для пасажирів далекого, місцевого і приміського сполучень через квиткові каси вокзалу за допомогою Єдиної автоматизованої системи керування пасажирськими перевезеннями на залізницях України (АСК ПП УЗ)).

З метою підвищення якості обслуговування пасажирів на вокзалі застосовуються такі види платних послуг: поновлення пошкоджених проїзних документів; послуги довідкового бюро; зберігання ручної поклажі в автоматизованих камерах схову (далі АКС); оголошення по вокзальному гучномовцю; надання письмових довідок; проживання пасажирів у кімнатах відпочинку (КВ); проживання пасажирів у кімнатах матері і дитини (КМіД); користування платним туалетом; виклик таксі по телефону; заряджання мобільних телефонів; зняття речей пасажира, який

відстав від поїзда; зберігання ручної поклажі в кімнаті ручної поклажі.

На підставі статистичного аналізу звітної документації вокзалу встановлено, що середньомісячна кількість пасажирів, які прямують у далекому сполученні, має математичне очікування 14454,8 пас/міс. із середньоквадратичним відхиленням 1673,98 і коефіцієнтом варіації 11,6 %. Це дає підстави вважати, що коливання обсягів перевезень пасажирів не є великими. Але відзначається чіткий мінімум у січні (11373 пас/міс.) і впевнений максимум у липні (17870 пас/міс.).

За критерієм згоди  $\chi^2$  Пірсона встановлено, що середньомісячна кількість пасажирів підкорюється статистичному розподілу Берра з функцією щільності розподілу

$$f(x) = \frac{8.879 \left(\frac{x}{13035}\right)^{27.189}}{13035 \left(1 + \left(\frac{x}{13035}\right)^{28.189}\right)^{1.315}} \quad (1)$$

Функція щільності імовірності розподілу кількості пасажирів вокзалу станції, пас/міс., наведено на рис. 2.

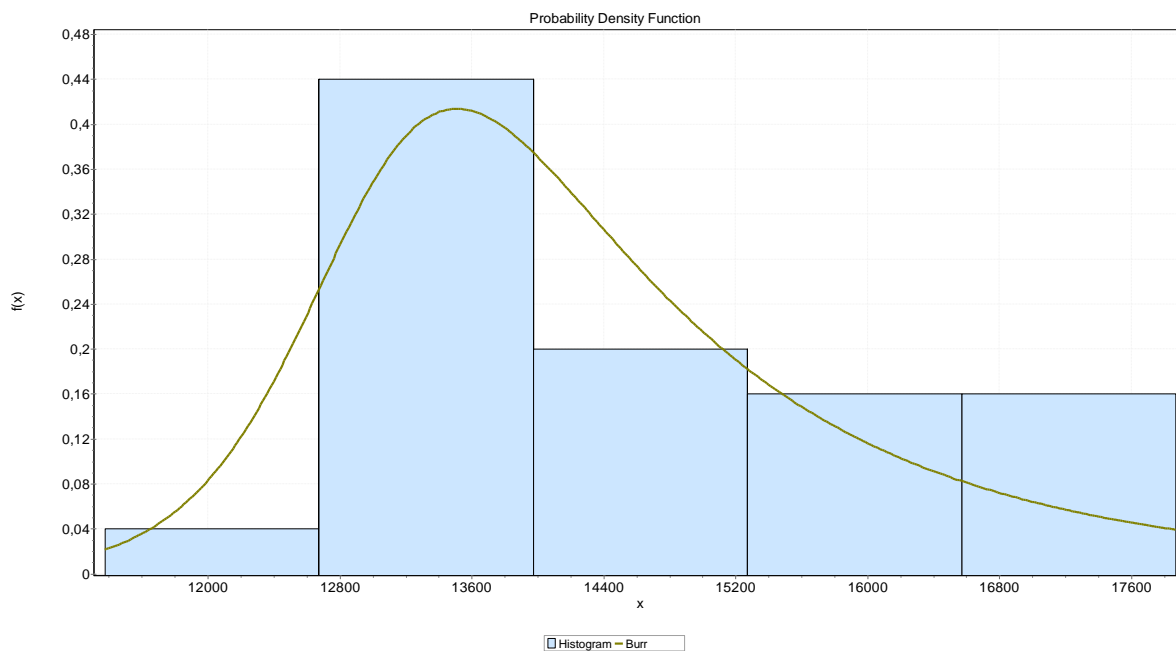


Рис. 2. Функція щільності імовірності кількості пасажирів вокзалу

Для прогнозування часових рядів середньомісячної кількості пасажирів використано алгоритм машинного навчання з урахуванням ретроспективних даних і метод експоненціального потрійного згладжування (ETS) Хольта-Вінтерса. Прийнято, що сезонна компонента кількості пасажирів має адитивну природу, оскільки з заздалегідь відомим періодом у вихідному ряду виявляються досить постійні періодичні відхилення в абсолютному вираженні від математичного очікування.

При адитивній сезонності компоненти рівня обчислено як

$$S_t = \alpha(X_t - c_{t-L}) + (1 - \alpha)(S_{t-1} + b_{t-1}), \quad (2)$$

де  $t$  – період розрахунку;

$X_t$  – значення вихідного часового ряду в період  $t$ ;

$S_t$  – позбавлене від сезонності, згладжене значення в період  $t$ , яке є компонентом рівня;

$b_t$  – трендовий компонент ряду;

$c_t$  – сезонний компонент ряду;

$\alpha$  – коефіцієнт згладжування рівня,  $\alpha \in (0, 1)$ ;

$L$  – довжина сезону в періодах.

Трендовий компонент ряду оновлюється за правилом

$$b_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta) \cdot b_{t-1}, \quad (3)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт згладжування тренда,  $\beta \in (0, 1)$ .

Сезонний компонент ряду оновлюється за відповідною формулою

$$c_t = \xi(X_t - S_t) + (1 - \xi)c_{t-L}, \quad (4)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт згладжування сезонності,  $\xi \in (0, 1)$ .

За допомогою коефіцієнтів згладжування розподіляється вага впливу поточного значення та згладженого попереднього значення. Прийнято при обчисленні згладженого значення, що якщо відповідний коефіцієнт ближче до 1, то більше враховуються величини поточного і найближчих попередніх значень.

На відміну від простого і подвійного експоненціального згладжування, прогнозування за допомогою моделі потрійного експоненціального згладжування (ETS) Хольта-Вінтерса враховує чинники тренда та сезонності. Прогнозування здійснюється за формулою

$$F_{t+m} = S_t + \lambda b_t + c_{t-L+m}, \quad (5)$$

де  $\lambda$  – кількість періодів, на які ведеться прогнозування.

Довірчий інтервал для прогнозної величини кількості пасажирів обчислено з точністю 95 %, а коефіцієнт сезонності дорівнює 12. Результати прогнозування, пас/міс., наведено на рис. 3.

Аналіз звітної документації вокзалу показав, що на рівень дохідності істотно впливає кількість пасажирів пільгових категорій. Встановлено, що середнє співвідношення кількості пасажирів і пасажирів пільгових категорій складає відповідно 17 та 83 % загального пасажиропотоку. Динаміку відповідного співвідношення наведено на рис. 4.

З урахуванням кількості пільгових пасажирів середня дійсна питома дохідна ставка в місцевих доходах від одного пасажирів далекого сполучення складає 13,28 грн/пас. Середня дійсна питома дохідна ставка в загальних доходах від одного пасажирів далекого сполучення складає 174,10 грн/пас. Динаміку питомої дохідної ставки від одного пасажирів далекого сполучення наведено на рис. 5.

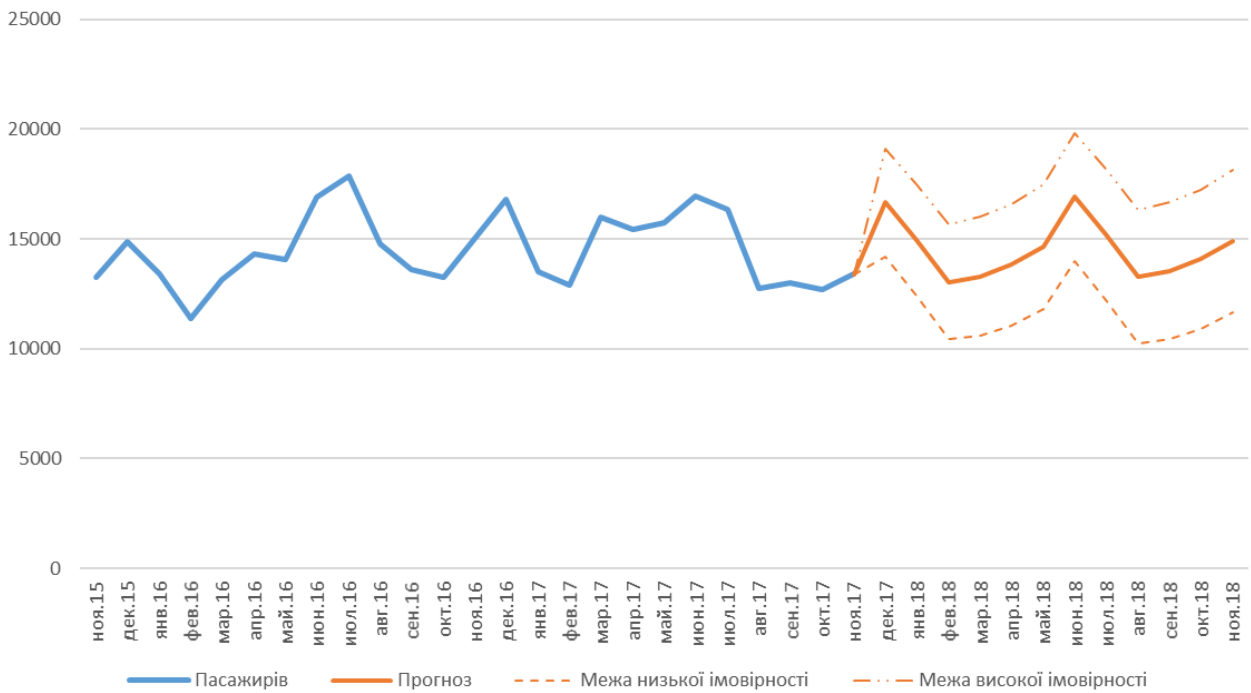


Рис. 3. Прогнозування кількості пасажирів вокзалу

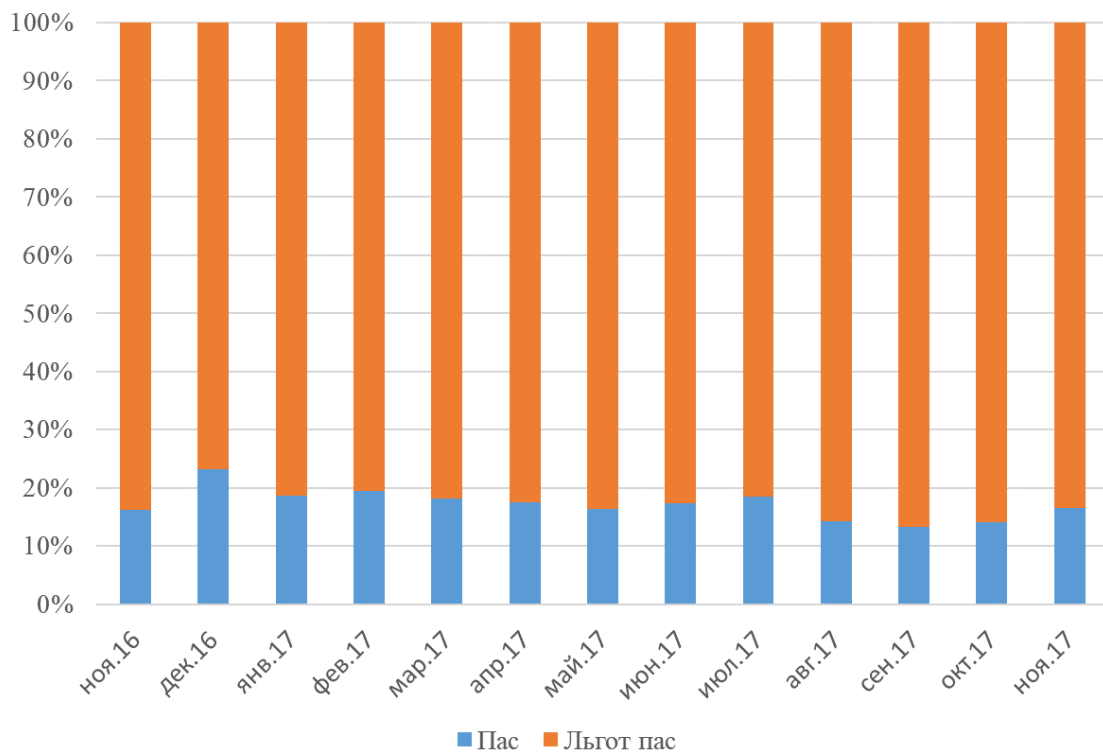


Рис. 4. Динаміка співвідношення кількості пасажирів і пасажирів пільгових категорій

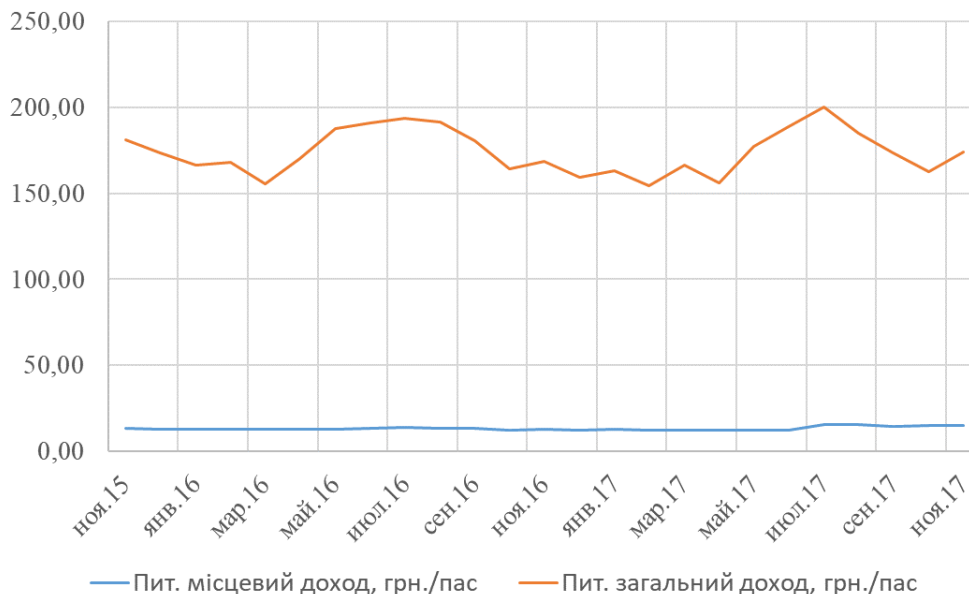


Рис. 5. Динаміка питомої дохідної ставки від одного пасажера далекого сполучення

Запропоновано розширити перелік платних послуг та удосконалити технологію сервісного обслуговування пасажирів на вокзалі станції в умовах швидкісного руху шляхом створення сервіс-центру. Відповідно до переліку послуг [7], що додатково надаватимуться сервіс-центром на вокзалі, віднесено бронювання залізничних квитків, продаж залізничних квитків, доставка залізничних квитків, гарячі страви в кафе, послуги міжміського телефонного зв'язку, міжнародний телефонний зв'язок, отримання та надсилання факсів, інтернет-послуги, зал переговорів з комплексним обслуговуванням, туристичні екскурсійні послуги, перукарські послуги, бронювання готелів по місту та області, фото-послуги, послуги банкоматів, авіаційні каси, комп'ютерні послуги, послуги копіювання, ламінування, послуги бригади носіїв та інші послуги.

Сумарні витрати сервіс-центру з урахуванням податків встановлено як

$$W = \sum_{i \in [1;9]} B_i \leq E_{\text{дох}} \quad (6)$$

де  $B_1$ - $B_9$  – відповідно витрати на заробітну плату працівників, на спеціальний одяг працівників, на утримання швидкозношувального обладнання, на опалення приміщень, на електроенергію, на утримання приміщень сервіс-центру, амортизаційні витрати, витрати на споживання води, накладні витрати сервіс-центру, грн./міс.;

$E_{\text{дох}}$  – обсяг доходів від надання сервісних послуг з урахуванням прогнозу кількості пасажирів, грн./міс.

Шляхом розрахунків за формулою (6) і відповідно до підходів, що викладено в роботі [7], на розрахункову прогнозу кількість пасажирів дохідність сервіс-центру складе  $E_{\text{дох}}=348138,0$  грн/міс., або середня вартість послуги на прогнозного 1 пасажера становить  $E_{\text{дох}}^1=24,09$  грн/пас. Як зазначено вище, існуюча середня дійсна питома дохідна ставка в місцевих доходах від одного пасажера далекого сполучення складає 13,28 грн/пас. Таким чином, можна вважати, що застосування удосконаленої технології надання послуг пасажирам через сервіс-центр дозволяє досягти точки беззбитковості та отримати для вокзалу станції додаткові доходи в розмірі  $24,09 - 13,28 = 10,81$  грн/пас.

**Висновок.** Рівень сервісного обслуговування в умовах вокзалу станції залежить від наявності додаткових послуг з урахуванням зростаючих вимог до сервісного обслуговування. При цьому слід враховувати особливості планувальних рішень у комерційних зонах вокзалів, наявність і місце розташування сервіс-центру, наявність засобів для надання комплексних послуг. Пасажиropотоки вокзалу, що досліджується,

характеризуються незначною нерівномірністю пасажиропотоків за часовими періодами, тому це необхідно враховувати при формуванні технології сервісного обслуговування. Перспективні тенденції в розвитку технології сервісного обслуговування пов'язані з переходом від вокзалів до комплексних ТПВ, у яких взаємодіють швидкісний залізничний, автомобільний і міський і приміський види транспорту.

### *Список використаних джерел*

1. Ломотько, Д. Шляхи удосконалення технології мультимодальних швидкісних пасажирських перевезень [Електронний ресурс] / Д. Ломотько, Д. Воскобойников, М. Листопад, А. Сірадчук // Транспортні системи та технології перевезень. – 2017. – N 13. – С. 59-66. – Режим доступу : DOI : 10.15802/tstt2017/110770.
2. Бутько, Т. В. Удосконалення системи оперативного прогнозування пасажирських потоків на основі використання інтелектуальних технологій [Текст] / Т. В. Бутько, А. В. Прохорченко // Зб. наук. праць. – Харків : УкрДАЗТ, 2007. – С. 161-171.
3. Yixiang Yue, Shifeng Wang, Leishan Zhou, Lu Tong, M. Rapik Saat, Optimizing train stopping patterns and schedules for high-speed passenger rail corridors, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 63, February 2016, P. 126-146, ISSN 0968-090X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.12.007>.
4. Журба, О. О. Моделювання процесу пересадки пасажирів на залізничному вокзалі Харків-пасажирський за варіантом “пасажирський поїзд – міський транспорт” [Текст] / О. О. Журба // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 119. – С. 60-66.
5. Helbing, D. Social force model for pedestrian dynamics [Text] / D. Helbing // Physical review E. – May 1995. – Vol. 51. – № 5. – P. 4282-4286.
6. Ломотько, Д. В. Formation of fuzzy support system for decision-making on merchantability of rolling stock in its allocation / Д. В. Ломотько, А. О. Ковальов, О. В. Ковальова // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Т. 6. – № 3(78). – С. 11-17, <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54496>
7. Ломотько, Д. В. Анализ рівня сервісу в умовах транспортно-пересадочних вузлів на високошвидкісних залізничних магістралях [Текст] / Д. В. Ломотько, Г. Г. Даценко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 161. – С. 25-35.
8. Угрюмов, А. К. Оперативное управление движением на железнодорожном транспорте [Текст] / А. К. Угрюмов. – М. : Транспорт, 1983. – 239 с.
9. Торопов, Б. И. Развитие пассажирских комплексов на основе закономерностей формирования пассажиропотоков [Текст] : дисс... канд. техн. наук: 05.22.00 / Торопов Борис Иванович. – К. : Киевский институт железнодорожного транспорта, 2000. – 154 с.
10. Евреенова, Н. Ю. Выбор параметров транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.22.08 / Евреенова Надежда Юрьевна. – М. : Московский государственный университет путей сообщения, 2014. – 255 с.

11. Резер, С. М. Логистика пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте [Текст] / С. М. Резер. – М. : ВИНТИ РАН, 2007. – 516 с.

---

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, кафедра транспортних систем та логістики Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-55. E-mail: den@kart.edu.ua.  
Лебедь Єлизавета Юрївна, магістрант кафедри транспортних систем та логістики Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (095) 300-02-13. E-mail: lebed\_elizaveta@ukr.net.

Ломотько Денис Викторович, доктор технических наук, профессор, кафедра транспортных систем и логистики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. : (057) 730-19-55.  
E-mail: den@kart.edu.ua.

Лебедь Елизавета Юрьевна, магистрант кафедры транспортные системы и логистика Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. : (095) 300-02-13.  
E-mail: lebed\_elizaveta@ukr.net.

Lomotko Denis, Doct. of techn. sciences, Professor, Department of Transport and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-55. E-mail: den@kart.edu.ua.  
Lebed' Yelizaveta, master Department of Transport and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (095) 300-02-13 E-mail: lebed\_elizaveta@ukr.net.

Статтю прийнято 14.02.2018 р.

УДК 621.313.322

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ В СИСТЕМАХ НЕТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Кандидати техн. наук О. Д. Супрун, О. І. Семененко, асист. Ю. О. Семененко

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В СИСТЕМАХ НЕТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Кандидаты техн. наук А. Д. Супрун, А. И. Семененко, ассист. Ю. А. Семененко

## **INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY IN SYSTEMS WITHOUT RIGID ELECTRIC SUPPLY**

Ph.D., associate professor O. D. Suprun, Ph.D., O. I. Semenenko, assistant Y. O. Semenenko

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127046

---

*У статті вирішується завдання підвищення енергетичної ефективності в системах нетягового електропостачання шляхом інтегрування дизель-інерційної установки гарантованого живлення в систему електропостачання тягових підстанцій.*

*Розроблено схему дизель-інерційної УГЖ на базі суміщеної асинхронізованої електричної машини з різною кількістю витків статорних обмоток. Запропонована система електропостачання ВЛ СЦБ з використанням комбінованої установки дозволяє забезпечити підвищення якості електричної енергії, яка вимагається на шинах живлення ВЛ СЦБ при коливаннях і вимиканнях напруги на шинах РП 10 кВ підстанції.*

Запропоновано способи забезпечення якісного електропостачання електроприймачів, засновані на адаптивному керуванні системою при зміні напруги мережевого вводу до її зникнення. Дослідження перехідних процесів УГЖ здійснено в прикладному пакеті моделювання MATLAB & Simulink.

**Ключові слова:** установка гарантованого живлення, тягова підстанція, нетягове електропостачання, суміщена електрична машина, розподільний пристрій, якість електроенергії.

В статті розглядається задача підвищення енергетичної ефективності в системі нетягового електропостачання шляхом інтегрування дизель-інерційної установки гарантованого живлення та вітроенергетичної установки в систему електропостачання тягових підстанцій.

Розроблена схема дизель-інерційної УГЖ на базі суміщеної асинхронізованої електричної машини з різним числом витків статорних обмоток. Предложена система електропостачання ВЛ СЦБ з використанням комбінованої установки дозволяє забезпечити якість напруги, вимагається на шинах живлення ВЛ СЦБ при коливаннях та відключеннях напруги на шинах РУ 10 кВ підстанції.

Предложены способы обеспечения качественного электроснабжения электроприемников, основанные на адаптивном управлении системой при изменении напряжения сетевого ввода до ее исчезновения. Исследование переходных процессов УГЖ осуществлено в прикладном пакете моделирования MATLAB & Simulink.

**Ключевые слова:** установка гарантированного питания, тяговая подстанция, нетяговое электроснабжение, совмещенная электрическая машина, распределительное устройство, качество электроэнергии.

The article solves the problem of increasing energy efficiency in a non-traction power supply system by integrating a diesel-inertia plant of guaranteed power and a wind power plant into the power supply system of traction substations. The rationale for the efficiency of the application of diesel-inertia units on the newest block-module traction substations has been fulfilled.

A scheme of diesel-inertia UGW is developed on the basis of a combined asynchronous electric machine with a different number of turns of stator windings. The proposed system of power supply for VL STP using a combined installation allows, in contrast to existing ones, to ensure the quality of voltage is required on the power supply buses of the HV SC with fluctuations and voltage cutoffs on the RU 10 kV buses of the substation, as well as for various abnormal phenomena in the RU 10 kV circles.

The proposed methods for providing high-quality power supply to electric receivers, based on adaptive system control when the voltage of the network input changes before it disappears. The introduction of this power supply system of the HV STP makes it possible to compensate the reactive power of the load, is powered from the buses of the 10 kV substation, without the use of high cost static reactive power compensation equipment. The research of transient processes of UGW is carried out in the application package of modeling MATLAB & Simulink.

**Key words:** installation of guaranteed power supply, traction substation, and not traction power supply, combined electric machine, switchgear, power quality.

**Вступ.** Специфіка систем електропостачання пристроїв СЦБ, живлення яких забезпечується від тягових підстанцій, безпосередньо впливає на якість і

надійність електроенергії, які не завжди відповідають вимогам електроприймачів першої категорії [1-3]. У результаті на коефіцієнт ефективності для нетягових

споживачів мають вплив всі режими тяги, робота випрямних агрегатів електрорухомого складу і випрямних та інверторних агрегатів підстанцій. У першу чергу проблеми виникають з коефіцієнтом ефективності на фідерах повздожнього електропостачання 6(10) кВ і на фідерах ВЛ СЦБ. Як правило, у мережі мають місце потоки реактивної енергії, кидки і провали напруги, протікання струмів вищих гармонік, перекид фаз і відхилення частоти, несиметрія форми кривої напруги, несиметрія напруги по оборотній і нульовій послідовностях, перекручування форми кривої напруги. Такі явища призводять до збільшення витрат і втрат електричної енергії, роботи електрообладнання в режимі перевантаження, зниження рівня надійності.

Нині для живлення власних потреб [3-5] використовуються трансформатори власних потреб (ТВП) потужністю до 630 кВА; джерела безперебійного живлення. Для забезпечення надійного живлення найбільш важливих споживачів [4], що належать до особливої групи надійності і не допускають у своєму електропостачанні навіть перерви синусоїди, служать джерела безперебійного живлення. Отже, забезпечення живлення цих споживачів є пріоритетним і актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З огляду на швидке зростання технічних засобів, що вимагають безперебійного електропостачання, необхідно усунути всі недоліки, властиві системам безперебійного електропостачання зі звичайними електроагрегатами. Для цього за останні роки були проведені великі роботи зі створення спеціальних джерел гарантованого живлення [2-4]. Розроблені й виробляються УГЖ англійськими фірмами *Pelapone* потужністю 12 кВт; *Davey Paxman* потужністю 200 кВт; *Petbow* 100-200 кВт, японською фірмою *Densei* потужністю 5-100 кВт; німецькою фірмою *BaUscher* 100-200 кВт, російськими підприємствами 10-630 кВт [5]. Нині розроблено і застосову-

ється значна кількість схем для перетворення енергії вітру на електричну енергію [3]. У сучасних ВЕУ перетворення енергії вітру здійснюється в основному тільки у схемах із генеруванням змінного струму [1-4]. Режими спільної роботи ДГУ і ВЕУ з асинхронізованим генератором вимагають, щоб добуток номінальної частоти обертання вітроподвигуна  $n_{вк}$  і передаточного відношення мультиплікатора  $i$  дорівнював синхронній частоті обертання  $n_c$  СГ і, таким чином, відповідав частоті мережі.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є поліпшення енергетичної ефективності систем нетягового електропостачання шляхом інтегрування дизель-інерційної установки гарантованого живлення в систему електричної тяги. Завданням дослідження в статті є розроблення дизель-інерційної УГЖ на базі суміщеної асинхронізованої електричної машини з різною кількістю витків статорних обмоток; розроблення системи електропостачання ВЛ СЦБ з використанням комбінованої установки; дослідження способів поліпшення якісного електропостачання електроприймачів пристроїв СЦБ.

**Основна частина дослідження.** У системах автономного електропостачання, у яких як резервне джерело електричної енергії використовуються дизель-генераторні електростанції, доцільно мати маховичні установки гарантованого живлення з електромашинними перетворювачами електричної енергії. Найбільш небезпечним режимом роботи таких установок, що підтверджується результатами досліджень [6-12], є режим переходу електропостачання від зовнішньої мережі на резервне джерело. У перехідних режимах роботи інерційні установки гарантованого живлення в ряді випадків не дозволяють забезпечити необхідні показники якості електричної енергії. У випадку застосування в системі електроприймачів, менш вимогливих до відхилення частоти і більш вимогливих до



відхилення напруги, найбільш ефективним є застосування способу зміни кількості витків статорних обмоток. При застосуванні СЕМ з двома самостійними статорними обмотками з різною кількістю

витків можна збільшити час роботи суміщеної електричної машини від маховика на величину  $\Delta t = t_2 - t_1$ , проаналізувавши всі недоліки існуючих схем живлення (рис. 1) пристроїв ВЛ СЦБ.

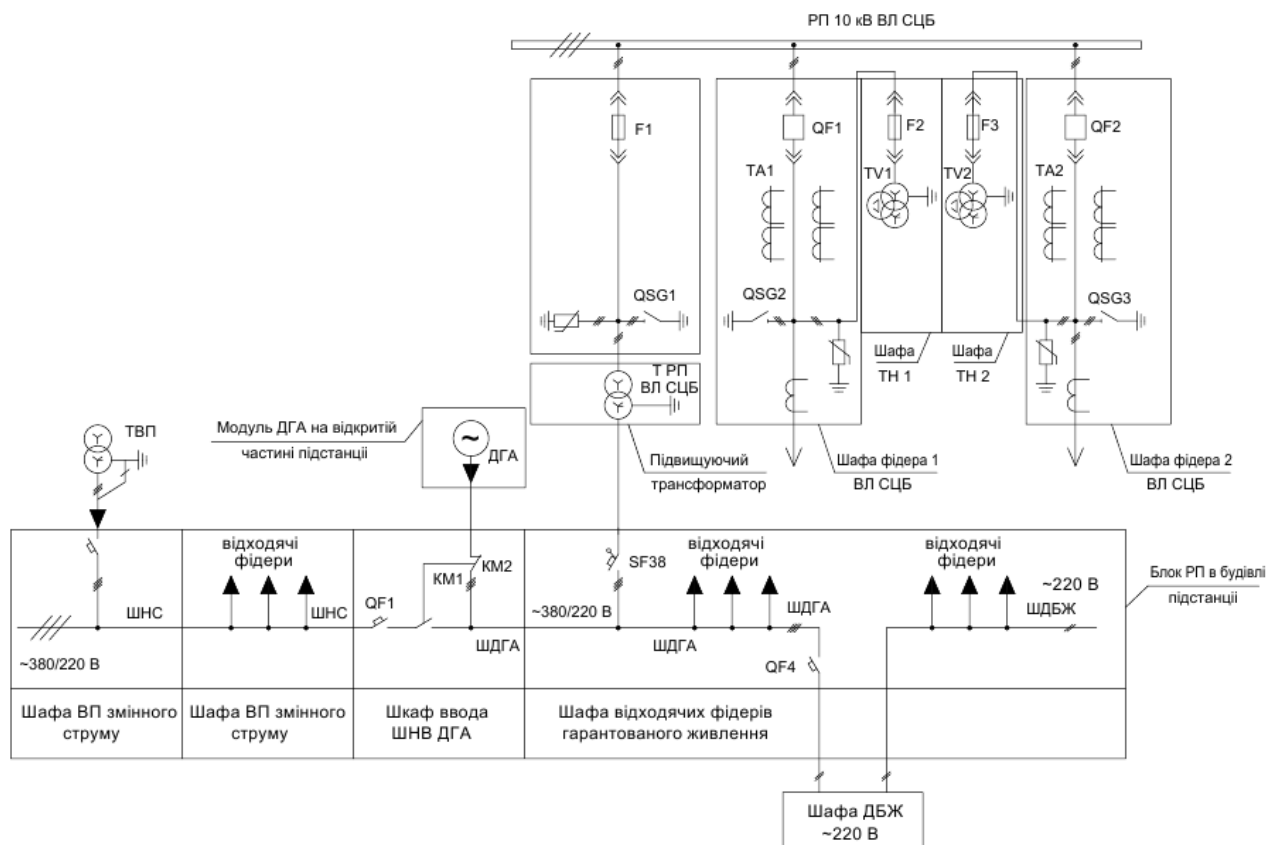


Рис. 1. Існуюча схема живлення нетягових споживачів

У вимогах до якості електроенергії живлення пристроїв СЦБ та зв'язку [12] запропонована схема живлення ВЛ СЦБ з використанням дизель-інерційної комбінованої установки (КУ) на базі електричної машини з двома статорними обмотками (рис. 2). Така схема живлення пристроїв ВЛ СЦБ дає можливість позбутися роз'єднувальних трансформаторів і разом з тим збільшених втрат, характерних для цієї схеми, через подвійну трансформацію. Однак при цьому забезпечується зменшення впливу тягової мережі на ВЛ СЦБ та покращення умов роботи релейного захисту. Крім того, схема дозволяє позбутися високовартісних пристроїв поперечної компенсації реактивної

потужності на лініях, що живлять районні споживачі, тому що в нормальному режимі електрична машина працює у двигун-компенсаторному режимі, а в режимі автономного та резервного електропостачання – у генератор-компенсаторному режимі.

При використанні такої схеми електропостачання пристроїв ВЛ СЦБ живлення трансформаторів власних потреб доцільно здійснювати від шин 10 кВ. Це дозволяє розвантажити тягову обмотку трансформаторів. Окрім того, напруга на шинах 10 кВ більш стабільна, у той час як на шинах 27,5 кВ мають місце великі коливання напруги через непостійність тягового навантаження.

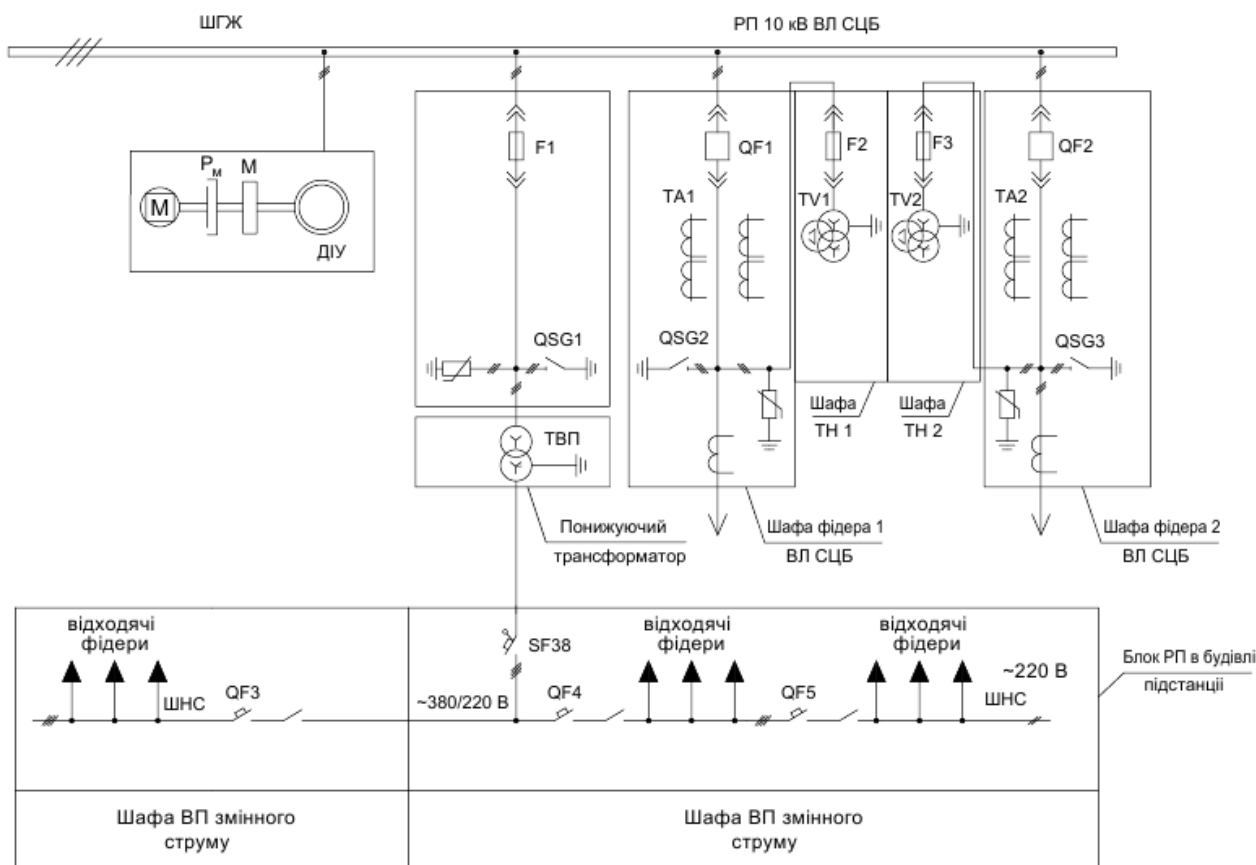


Рис. 2. Запропонована схема живлення нетягових споживачів

Схемна реалізація даного способу наведена на рис. 3 і докладно описана в роботі [9]. Дизель-інерційна УГЖ складається з основного джерела 1 живлення, комутаційного апарата 2, вимикача 3, шин джерела гарантованого живлення 4 з підключеними до них електроприймачами 5 відповідальних споживачів і буферної установки у вигляді асинхронізованої синхронної машини (АСМ) 6, що містить дві симетричні самостійні статорні обмотки з різною кількістю витків незалежної системи збудження 7 та інерційним маховиком 8 на валу з'єднаних за допомогою роз'єднувальної муфти 9 з первинним двигуном системи 10 автоматичного регулювання та керування. Незалежна система збудження 7 містить розташований на валу ротора АСМ 6 допоміжний генератор 11, що живить силову частину

тиристорного перетворювача частоти 12, підключеного до обмотки збудження 13 АСМ 6. Система 10 автоматичного регулювання та керування містить перетворювально-командний блок 14, що має чотири входні канали регулювання відповідно за величиною ковзання 15, реактивної потужності 16, напруги 17, частоти струму 18 і вихідний канал управління перетворювачем частоти 12, виконаного за принципом регулятора перетворювача частоти, що дозволяє виконати функції керування і регулювання АСМ 6 відповідно до заданих величин.

Регулятор 19 ковзання, перший вхід 20 якого підключений до датчика 21 частоти, другий вхід 26 підключено до датчика 22 кутової швидкості обертання вала ротора, третій вхід 23 приєднано до датчика 24 ковзання, а вихід через перемикальний елемент 25, виконаний на

базі логічного елемента 11, підключено до каналу регулювання за величиною ковзання 15 перетворювально-командного блока 14, виконаного за блок-схемою регулятора швидкості обертання вала електродвигуна, що порівнює задану і фактичну кутову частоту ковзання. Регулятор 26 реактивної потужності, на перший вхід 27 якого підключено датчик 28 напруги, на другий 29 – датчик 30 струму, на третій 31 – задатчик 32 реактивної потужності, а вихід через перемикальний елемент 33, виконаний на базі логічного елемента 11, підключено до каналу регулювання за

величиною реактивної потужності 16 перетворювально-командного блока 14, що порівнює задану і фактичну величину реактивної потужності. Регулятор 34 напруги, до першого входу 35 якого приєднано задатчик 36 величини напруги, до другого 37 – датчик 28 напруги, а вихід через перемикальний елемент 38, виконаного на базі логічного елемента 11, підключено до каналу регулювання за величиною напруги 17 перетворювально-командного блока 14, що порівнює задану і фактичну величини напруги.

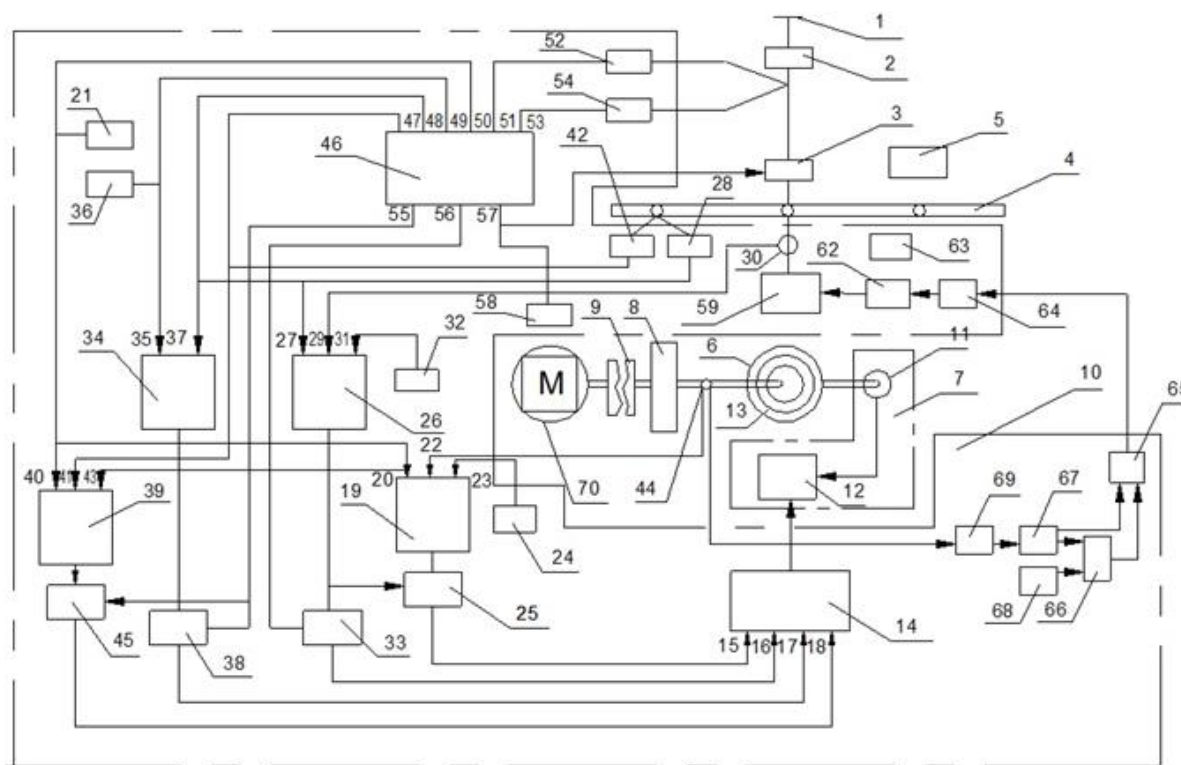


Рис. 3. Схема дизель-інерційної УГЖ на базі суміщеної електричної машини з різною кількістю витків статорних обмоток

Регулятор 34 напруги, до першого входу 35 якого приєднаний задатчик 36 величини напруги, до другого 37 – датчик 28 напруги, а вихід через перемикальний елемент 38, виконаного на базі логічного елемента 11, підключено до каналу регулювання за величиною напруги 17 перетворювально-командного блока 14, що

порівнює задану і фактичну величини напруги.

Регулятор 39 частоти, до першого входу 40 якого приєднаний задатчик 21 частоти, до другого входу 41 – датчик 42 частоти струму, до третього входу 43 підключений датчик 44 кутової швидкості обертання вала ротора, а вихід через

перемикальний елемент 45, виконаний на базі логічного елемента 11, приєднано до каналу регулювання за величиною частоти струму 18 перетворювально-командного блока 14, побудований за блок-схемою регулятора кутової швидкості обертання вала ротора електричної машини.

Блок 46 контролю параметрів мережі з підключеними до першого входу 47 датчиком 42 частоти струму, до другого входу 48 – датчиком 28 напруги, до третього входу 49 – задатчиком 36 напруги, до четвертого входу 50 – задатчиком 21 частоти, до п'ятого входу 51 – датчиком 52 напруги, до шостого входу 52 – датчиком 53 частоти, а до першого виходу 54 приєднані керуючі входи перемикальних елементів 38, 45, до другого виходу 55 – керуючі входи перемикальних елементів 25, 33, до третього виходу 56 – керуючий вхід статичного вимикача 3 і вхід реле пуску 57 первинного двигуна, побудовано за блок-схемами пристроїв автоматичного повторного включення лінії з двостороннім живленням і очікуванням синхронізму, точної автоматичної синхронізації, що забезпечує виконання логічних операцій порівняння заданих параметрів мережі з фактичними, контроль за збігом фаз напруги при синхронізації АСМ 6 з електромережею 1 і реалізації виконання команди на вмикання-вимикання статичного вимикача 3 і перемикальних елементів 25, 33, 38, 45 і реле пуску 57, а також контроль за збігом фаз напруги при синхронізації АСМ 6 з електромережею.

Перемикальний пристрій 68 обмоток статора, виконано у вигляді функції логічного елемента НЕ-І повторювача, перший силовий вхід 59 якого підключений до обмотки статора з меншою кількістю витків 60, другий силовий вхід 61 підключений до обмотки статора з великою кількістю витків 62, силовий вихід підключений до шин гарантованого електроживлення 4, а до керуючого входу підключений вихід схеми АБО 63. До одного із входів схеми АБО підключений

вихід порогового елемента 64, приєднаного до шин гарантованого електроживлення 4, до іншого входу через дешифратор 65 підключений вихід лічильника 66, скидальні і рахункові входи якого підключені відповідно до інверсного і через схему І 67 прямого виходу тригера 68 і генератора імпульсів 69, вхід тригера підключений до формувачу імпульсів 70, підключеного до виходу датчика 44 кутової швидкості обертання вала ротора АСМ 6.

Система безперебійного електропостачання працює таким чином. У нормальному режимі електропостачання струмоприймачів 5 відповідальних споживачів здійснюється від електромережі 1 через комутаційний апарат 2, статичний вимикач 3, шини гарантованого електропостачання 4. АСМ 6 статорною обмоткою з меншою кількістю витків 60 через перемикальний пристрій 58 підключена до шин 4 гарантованого електроживлення, обертає маховик 8 і працює в режимі компенсатора. Роз'єднувальна муфта 9 роз'єднана і первинний двигун 71 знаходиться в готовності до пуску. У цьому режимі управління АСМ 6 здійснюється за заданою величиною ковзання вала ротора і реактивної потужності статора.

Підтримка заданого ковзання вала ротора забезпечується регулятором 19 ковзання, на перший вхід 20 якого надходить сигнал з задатчика 21 частоти, на третій вхід 23 – з задатчика ковзання 24, а на другий вхід 22 – з датчика 44 кутової швидкості обертання ротора. Регулятор 19 ковзання визначає фактичну величину і знак ковзання, порівнює його з заданою величиною, якщо величина і знак фактичного ковзання відрізняється від заданого, то виконує коректування і формує на виході сигнал регулювання, що через відкритий перемикальний елемент 25 надходить у канал регулювання за величиною ковзання 15 перетворювально-командного блока 14.

Регулювання величини реактивної потужності статора АСМ 6, що видається в

електромережу 1, здійснюється регулятором 26 реактивної потужності. На перший вхід 27 регулятора 26 реактивної потужності з датчика 28 напруги надходить сигнал, відповідний фактичній величині напруги на шинах 4, на другий вхід 29 з датчика 30 струму надходить сигнал, відповідний фактичній величині струму статора АСМ 6, на третій 31 вхід з датчика 32 реактивної потужності надходить сигнал, відповідний заданій величині реактивної потужності. Регулятор 26 реактивної потужності визначає фактичну величину реактивної потужності статора АСМ 6, порівнює її з заданою величиною реактивної потужності, якщо величина фактичної реактивної потужності відрізняється від заданої, то виконує коригування і формує на виході сигнал регулювання, що через відкритий перемикальний елемент 33 надходить у канал регулювання за величиною реактивної потужності 16 перетворювально-командного блока 14.

Перетворювально-командний блок 14 перетворює вхідні в канали регулювання за величиною ковзання 15 і величиною реактивної потужності 16 відповідно з регулятора 19 ковзання і регулятора 26 реактивної потужності в сигнали частоти ковзання вала ротора, формує на виході такий сигнал керування перетворювачем частоти 12, який визначає частоту, амплітуду, фазу напруги на його виході, а отже і струмів обмотки збудження 13 ротора АСМ 6. Це дозволяє створити обмоткою збудження 13 ротора обертальне відносно нього в потрібному напрямку колове поле з необхідною за режимом роботи амплітудою, частотою і фазою, що забезпечують задане ковзання вала ротора і величину реактивної потужності статора АСМ 6, що видається в електромережу 1.

При невідповідності сигналів з боку електромережі 1 з сигналом датчика 21 частоти і датчика 36 напруги при повному припиненні живлення з боку електромережі 1 блок 46 контролю

параметрів мережі формує сигнал на другому 55 виході на закриття перемикальних елементів 25 і 33, а на третьому 56 виході на вимикання статичного вимикача 3 і вимикання реле пуску 57 первинного двигуна 71. При впливі сигналу закривається перемикальний елемент 25, у результаті припиняється подача сигналу регулювання в канал регулювання за величиною ковзання 15 перетворювально-командного блока 14 з регулятора 19 ковзання, і перемикальний елемент 33, який припиняє подачу сигналу регулювання в канал регулювання за величиною реактивної потужності 16 перетворювально-командного блока 14 з регулятора 26 реактивної потужності. Одночасно відкриваються перемикальний елемент 38, через який у канал регулювання за величиною напруги 17 перетворювально-командного блока 14 надходить сигнал регулювання з регулятора 34 напруги, і перемикальний елемент 45, що забезпечує подачу сигналу регулювання в канал регулювання за величиною частоти струму 18 перетворювально-командного блока 14.

При цьому під впливом сигналу керування, який формується на третьому 56 виході блоком 46 контролю параметрів мережі, вмикається статичний вимикач 3 і відокремлює від електромережі 1 шини 4 гарантованого електропостачання з приєднаними до них струмоприймачами 5 відповідальних споживачів, і останні отримують живлення від АСМ 6, яка працює режимі генератора за рахунок запасеної кінетичної енергії інерційного маховика 8. Вмикається реле пуску 57, здійснюючи запуск первинного двигуна 71. У цьому автономному режимі керування АСМ 6 здійснюється за заданою величиною напруги і частоти його на шинах 4 гарантованого електроживлення.

Підтримка заданої величини напруги на шинах 4 гарантованого електропостачання забезпечується регулятором 34 напруги, на перший 35 вхід якого надходить з датчика 36 напруги сигнал,

відповідний заданій величині напруги, на другий вхід 37 надходить з датчика 28 напруги сигнал, відповідний фактичній величині напруги на шинах 4 гарантованого електроживлення. При зниженні напруги на шинах 4 гарантованого електропостачання за межі діапазону допустимих значень відкривається пороговий елемент 64, сигнал з його виходу через схему АБО 63 подається на керуючий вхід перемикального пристрою 58, який вимикає статорну обмотку з меншою кількістю витків 60 і підключає статорну обмотку з більшою кількістю витків 62. При цьому регулятор 34 напруги порівнює фактичну величину напруги з заданою величиною, і якщо вона відрізняється від заданої, то виконує коригування і формує на виході сигнал регулювання, що через відкритий перемикальний елемент 38 надходить у канал регулювання за величиною напруги 17 перетворювально-командного блока 14.

Регулювання величини частоти напруги статора здійснюється регулятором 39 частоти, на перший 40 вхід якого з датчика 21 частоти надходить сигнал, відповідний заданій величині частоти, на другий 41 вхід надходить з датчика 42 частоти сигнал, відповідний фактичному значенню частоти напруги на шинах 4 гарантованого електропостачання, на третій 43 вхід надходить з датчика кутової швидкості обертання ротора 44 сигнал, відповідний фактичним значенням кутової швидкості обертання вала ротора.

Одночасно з датчика 44 кутової швидкості обертання вала ротора надходять сигнали на формувач імпульсів 70, які перетворюються в імпульсні послідовності, період проходження яких пропорційний кутовій швидкості обертання вала АСМ 6 і надходить на вхід тригера 68. Прихід першого імпульсу з виходу формувача імпульсів 70 на тригер 68 встановлює його в одиничний стан, відкривається схема І 67 і лічильник 66 починає рахувати кількість

імпульсів, що надходять з виходу генератора імпульсів 69. Прихід другого імпульсу з виходу формувача імпульсів 70 викликає перехід тригера 68 в нульовий стан, при цьому схема І 67 закривається і припиняється запис у лічильнику 66. При зниженні кутової швидкості обертання вала ротора до деякого нижнього порогу  $\omega_{\text{міндоп}}$ , при якому напруга на затискачах АСМ 6 дорівнює гранично-допустимому значенню, число, записане в лічильнику 66, стає більше від заданого і з'являється сигнал на виході дешифратора 65, який надходить на схему АБО 63, а з її виходу на керуючий вхід перемикального пристрою 58. Тим самим забезпечується формування команди на спрацьовування перемикального пристрою 58, що забезпечує підключення обмотки статора з більшою кількістю витків 62 і вимикання обмотки статора з меншою кількістю витків 60.

При цьому регулятор 39 частоти постійно порівнює відповідність фактичного значення частоти на шинах 4 гарантованого електропостачання з заданим і на виході формує такий сигнал керування, щоб його величина була пропорційна різниці сигналів фактичної кутової швидкості обертання вала ротора і заданій величині частоти, за необхідності коректує вихідний сигнал, що через відкритий перемикальний елемент 45 надходить у канал регулювання за величиною частоти струму 18 перетворювально-командного блока 14. Перетворювально-командний блок 14 перетворює сигнали з регулятора 34 напруги і регулятора 39 частоти, що надходять у канали регулювання за величиною напруги 17 і величиною частоти струму 18, в сигнали частоти ковзання вала ротора і формує на виході такі сигнали керування перетворювачем частоти 12, який визначає частоту, амплітуду, фазу напруг на його виході, а отже, і струму обмотки збудження 13 АСМ 6.

Це дозволяє створити обмоткою збудження 13 обертальне відносно нього в

потрібному напрямку колове поле з необхідною за режимом роботи амплітудою, частотою і фазою, що забезпечують задане значення напруги і частоти на шинах гарантованого електроживлення. Завдяки особливостям, властивим АСМ 6, задана сталість частоти струму і напруги на затискачах статора забезпечується шляхом відповідної зміни частоти струму збудження ротора.

При відповідності всіх величин і виконанні умов синхронізації, що дозволяють включати на паралельну роботу з електромережею АСМ 6, блок 46 контролю параметрів мережі скасовує на третьому 56 виході сигнал на вимикання статичного вимикача 3 і вмикання реле пуску 57, на першому 54 виході сигнал на вмикання перемикальних елементів 38 і 45, на другому 55 виході сигнал на вимикання перемикальних елементів 25 і 33. При скасуванні блоком 46 контролю параметрів напруги в мережі на третьому 56 виході сигналу вмикається статичний вимикач 3 і з'єднує з електромережею 1 шини 4 гарантованого електроживлення. Вмикається реле пуску 57, первинний двигун 71 зупиняється. Одночасно закривається перемикальний елемент 38, у результаті припиняється подача сигналу регулювання в канал регулювання за величиною напруги 17 перетворювально-командного блока 14 з регулятора 34 напруги, перемикальний елемент 45, який припиняє подачу сигналу регулювання в канал регулювання за величиною частоти струму 18 перетворювально-командного блока 14 з регулятора 39 частоти, припинення надходження сигналів у канали регулювання за величиною напруги 17 і величиною частоти струму 18 перетворювально-командного блока 14, служить для нього командою переведення керування АСМ 6 з режиму генератора в режим компенсатора. Також відкривається перемикальний елемент 25, через який у канал регулювання за величиною ковзання 15 перетворювально-командного блока 14

надходить сигнал регулювання з регулятора 19 ковзання і відкривається перемикальний елемент 33, що забезпечує подачу сигналу регулювання в канал регулювання за величиною реактивної потужності перетворювально-командного блока 14 з регулятора 26 реактивної потужності. Таким чином, система безперебійного електропостачання струмоприймачів відповідальних споживачів працює у вихідному режимі.

Розроблено математичну модель [9] для дослідження перехідних процесів, які виникають при зникненні напруги з основного джерела живлення, а також при появі можливих збурень, і, як наслідок, відхилення параметрів показників якості електричної енергії. Аналіз роботи ДІУ виконаємо за розробленою математичною моделлю [10], використовуючи рівняння Горєва – Парка в системі відносних одиниць у такому вигляді:

$$V_d = R_c i_q + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega_r \varphi_q, \quad (2)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q - \omega_r \varphi_d, \quad (3)$$

$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{fd}, \quad (4)$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kd}, \quad (5)$$

$$V'_{kd1} = R'_{kd1} i'_{kd1} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kd1}, \quad (7)$$

$$V'_{kd2} = R'_{kd2} i'_{kd2} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kd2}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \varphi_{kd2} &= L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}), \\ \varphi_q &= L_q i_q + L_{mq} i'_{kq2} + L_{mq} i_q. \end{aligned}$$

Розв’язання системи диференціальних рівнянь електричної машини за повними рівняннями Горєва – Парка, які покладені в основу математичної моделі УГЖ, має певні труднощі. Тому дослідження перехідних процесів УГЖ здійснено в прикладному пакеті моделювання MATLAB & Simulink (рис. 4).

Зникнення живлення двигун-генератора з шин мережевого введення відбувається в момент часу  $t = 5$  с, час запуску дизеля при моделюванні прийнято  $t = 1,5$  с, час розгону приводного двигуна до пном при моделюванні прийнято  $t = 2,5$  с.

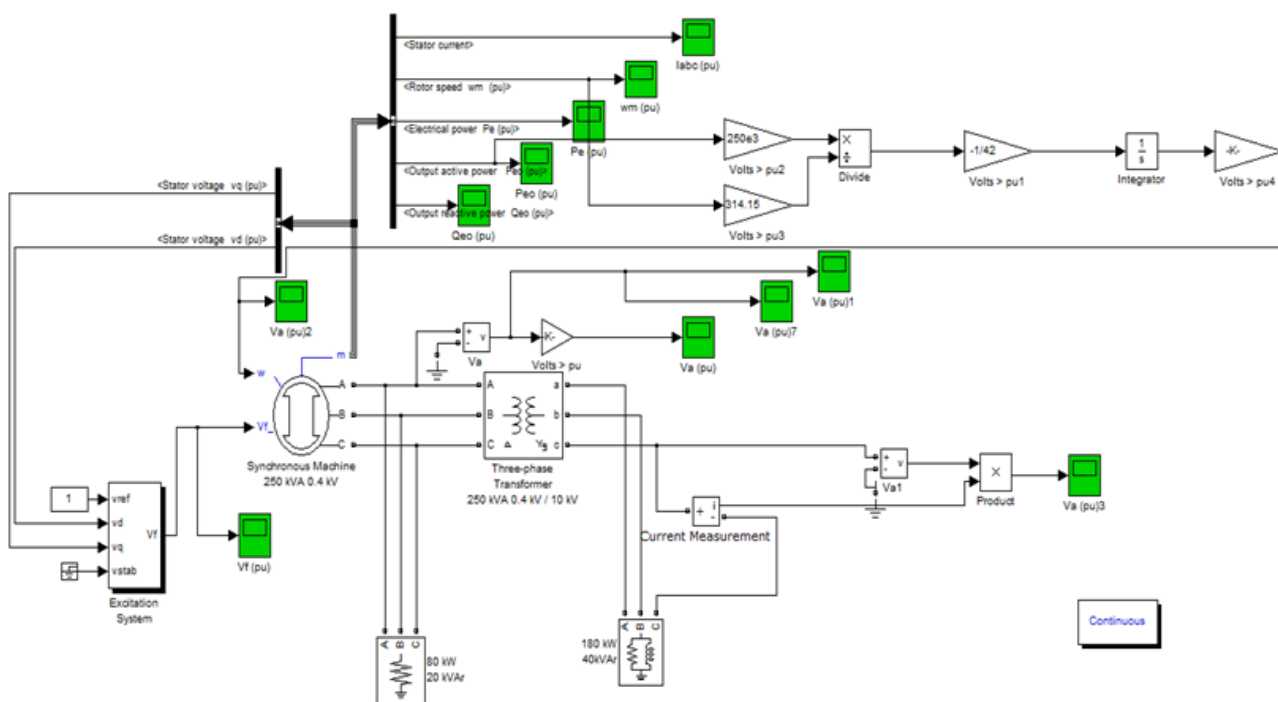


Рис. 4. Досліджувана схема в середовищі MATLAB & Simulink

Із осцилограми на рис. 5 видно, що період синусоїди відповідає частоті живлення на шинах гарантованого живлення  $f = 50$  Гц. Із осцилограми на рис. 6 видно, що період  $T = 0,021$  відповідає частоті напруги на шинах гарантованого живлення  $f = 47,6$  Гц.

Синхронний генератор приводиться в дію від приводного двигуна, на валу якого встановлений інерційний накопичувач енергії при  $n_{протора} = 1500$  об/хв. Із осцилограми видно, що період синусоїди  $T = 0,02$  с відповідає частоті напруги на шинах гарантованого живлення  $f = 50$  Гц.

У даному дослідженні, змінюючи струм збудження в рамках 0,85-1,15 номінального струму збудження,

розглядалася зміна реактивної потужності, що генерувалася синхронною машиною.

З дослідження компенсаторного режиму синхронної машини можна сказати, що, змінюючи струм збудження синхронної машини, можна регулювати реактивну потужність, що генерується нею. При недозбудженні ( $I_{зб} < I_{зб,ном}$ ) синхронної машини спостерігається споживання реактивної потужності з зовнішньої мережі електропостачання [12-15]. При перезбудженні синхронної машини ( $I_{зб} > I_{зб,ном}$ ) спостерігається віддача реактивної потужності в зовнішню мережу електропостачання. Наведені дослідження доводять, що синхронну машину економічно і технічно доцільно застосовувати в інерційних установках гарантованого живлення (рис. 7).



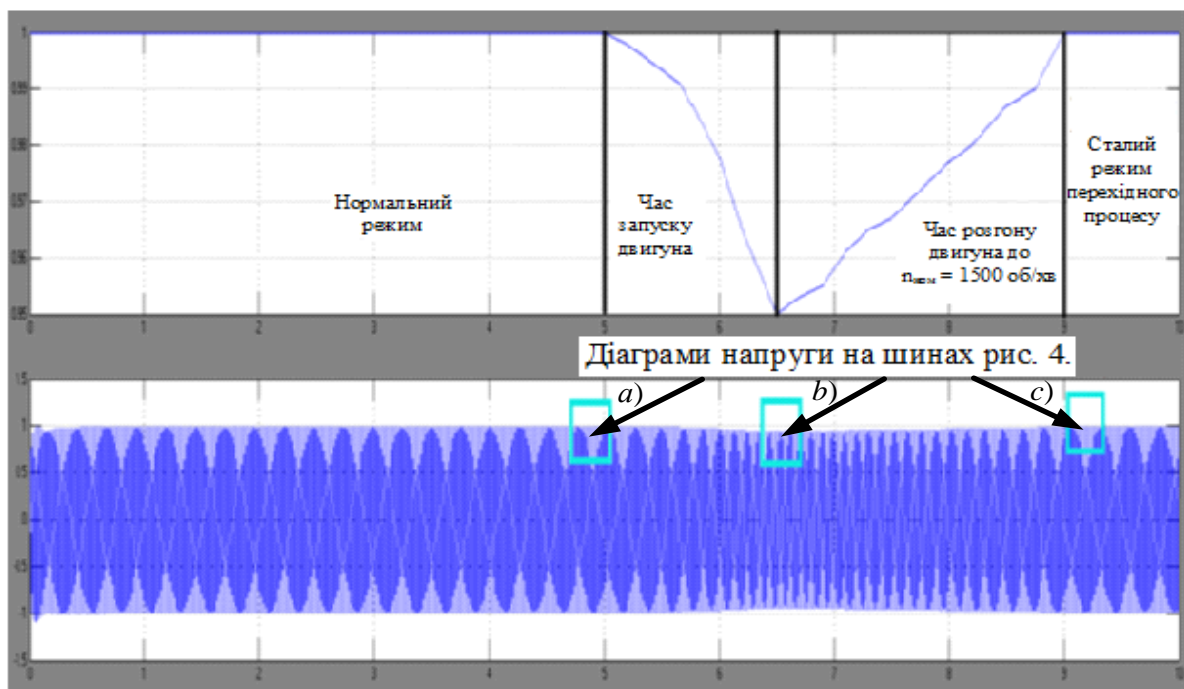


Рис. 5. Діаграма  $n_{\text{маховика}}(t)$ ,  $\omega_{\text{ротора}}(t)$ , осцилограма  $U(t)$

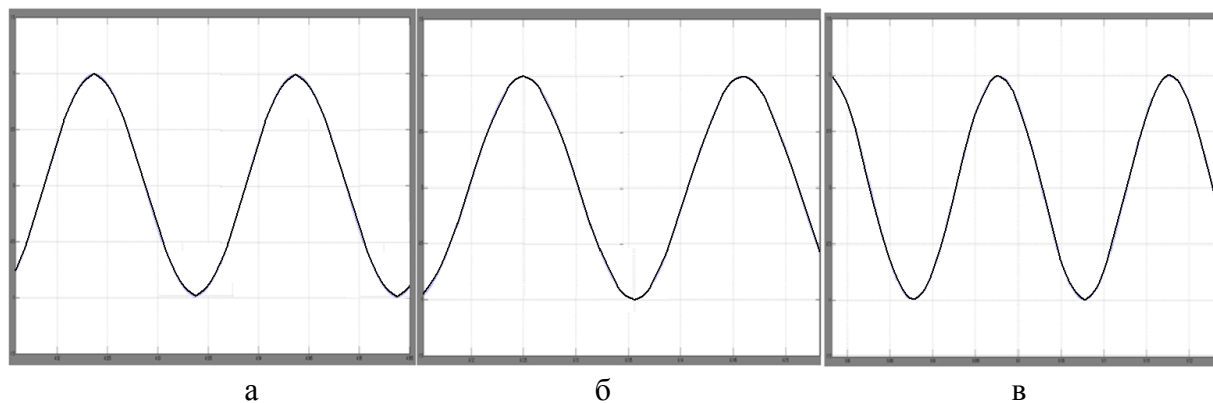


Рис. 6. Діаграми напруги на шинах:

а – мережного вводу при зникненні живлення  $t = 5,0$  с; б – генератора під час роботи від маховика в період вибігу  $t = 6,5$  с; в – мережного вводу в сталому режимі при  $t = 9$  с

**Висновки.** На основі виявлених недоліків, притаманних різним режимам роботи відомих натеper систем електропостачання пристроїв ВЛ СЦБ, була запропонована та розроблена система електропостачання з використанням комбінованої ДІУГЖ. Запропонована система електропостачання пристроїв ВЛ СЦБ з використанням ДІУ дозволяє, на

відміну від відомих, забезпечити якість напруги, що вимагається на шинах живлення ВЛ СЦБ при коливаннях і вимиканнях напруги на шинах РП 10 кВ підстанції, а також при різних аномальних явищах у колах РП 10 кВ. У запропонованій системі відсутній гальванічний зв'язок між мережею та шинами живлення ВЛ СЦБ. Крім того, використання даної системи

електропостачання пристроїв ВЛ СЦБ дає можливість компенсації реактивної потужності навантаження, що живиться від шин 10 кВ підстанції, без використання високовартісних статичних установок компенсації реактивної потужності.

У подальшому використанні комбінованої установки на основі машин з двома статорними обмотками дає можливість

живлення ВЛ СЦБ не тільки напругою промислової частоти 50 Гц, а й напругою інших частот у діапазоні від 25 до 400 Гц і забезпечує гальванічну розв'язку між мережею та шинами живлення ВЛ СЦБ. Такі рішення можуть бути корисними після проведення подальших досліджень і розроблень, пов'язаних з електропостачанням пристроїв живлення СЦБ.

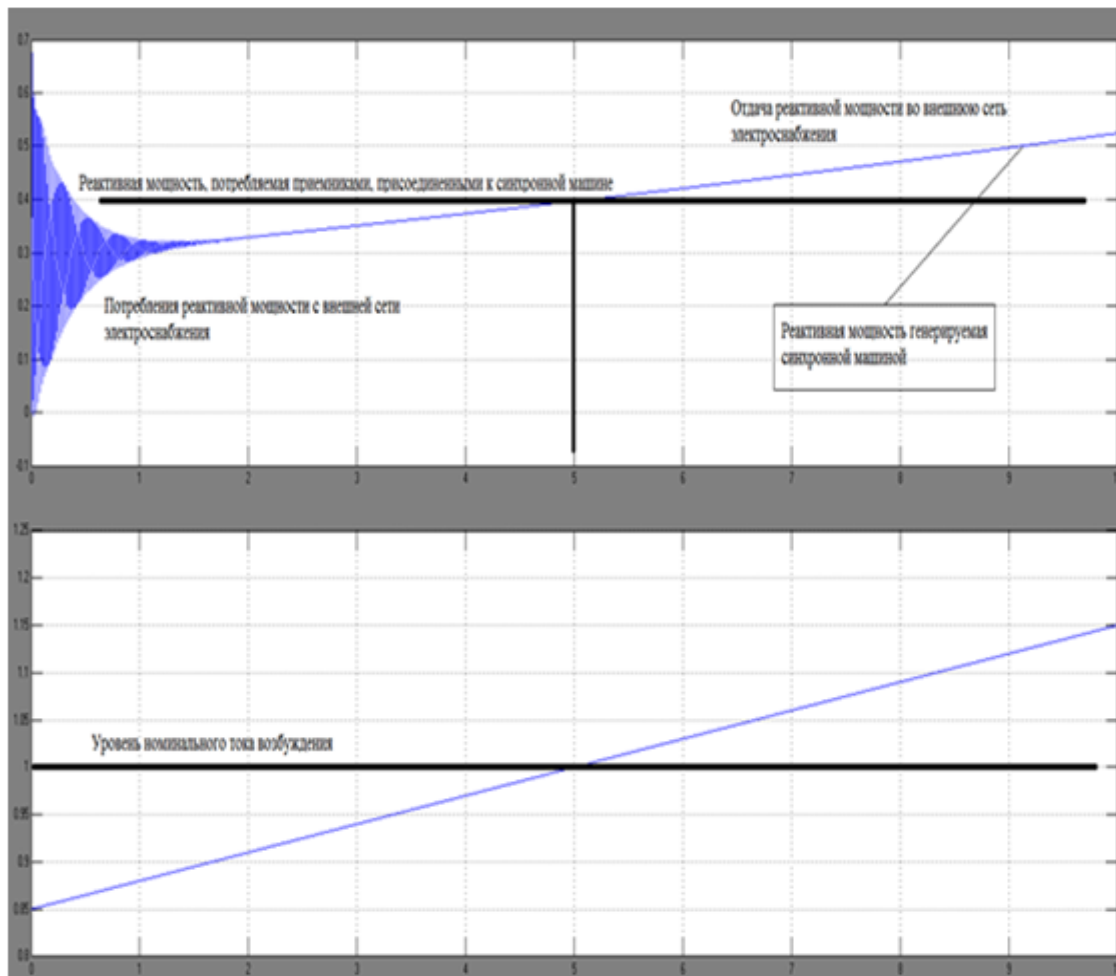


Рис. 7. Залежність реактивної потужності, генерованої синхронною машиною, від струму збудження

### Список використаних джерел

1. Марикин, А. Н. Новые технологии в сооружении и реконструкции тяговых подстанций [Текст] / А. Н. Марикин, А. В. Мизинцев. – М. : Маршрут, 2008. – 220 с.
2. Кононов, Б. Т. Основы теории дизель-инерционных установок гарантированного питания [Текст] : дисс... д-ра техн. наук / Б. Т. Кононов. – Харьков : ХВВКИУ РВ, 1989. – 204 с.

3. Лущик, В. Д. Совмещенные электрические машины и аппараты [Текст] / В. Д. Лущик. – К. : Техника, 1993. – 203 с.
4. Быков, Е. А. Разработка принципов построения систем гарантированного электроснабжения промышленных предприятий [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Е. А. Быков. – М. : , 2005. – 137 с.
5. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України [Текст] : ЦЕ-0009. – К., 2005. – 80 с.
6. Шакарян, Ю. Г. Вопросы теории синхронной машины с двумя системами статорных обмоток [Текст] / Ю. Г. Шакарян // Электричество. – 1996. – № 11. – С. 45-52.
7. Кривцов, В. С. Неисчерпаемая энергия [Текст] : учебник / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм.ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – Ч. 1. – 400 с.
8. Кривцов, В. С. Неисчерпаемая энергия [Текст] : учебник / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм.ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2004. – Ч. 2. – 519 с.
9. Система бесперебойного электроснабжения [Текст] : а.с. № 1677778 СССР, МКИ Н 02 J 9/06 / Виксман А. С., Кононов Б. Т., Лысенко М. П., Супрун А. Д. – № 4655969/07; заявл. 27.02.1989; опубл.15.09.1991, Бюл. № 34. – 6 с.
10. Супрун, О. Д. Дослідження перехідних режимів роботи установок гарантованого живлення блочно-модульних тягових підстанцій [Текст] / О. Д. Супрун, О. В. Коваленко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 66–99.
11. Супрун, О. Д. Дослідження аварійних режимів роботи агрегатів безперебійного живлення блочно-модульних тягових підстанцій [Текст] / О. Д. Супрун, Ю. О. Семененко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 165. – С. 77–84.
12. Супрун, О. Д. До питання впровадження джерел безперебійного живлення на тягових підстанціях при швидкісному русі [Текст] / О. Д. Супрун, Ю. О. Семененко, О. В. Ушкалов // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 169. – С. 129–141.
13. The DTT device: Power supplies and electrical distribution system [Text] / A. Lampasi [et al.] // Fusion Engineering and Design. – 2017, January.
14. Offset-Free Model Predictive Control for Output Voltage Regulation of Three-Phase Inverter for Uninterruptible Power Supply Applications [Text] / Seok-Kyoon Kim, Chang Reung Park, Young Il Lee // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Vol. 47. – P. 129-134.
15. Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe [Text] / H. C. Gils [et al.] // Energy. – 2017, January. – Vol. 123. – P. 173-188.

---

Супрун Олександр Данилович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74.

E-mail: [adsup@ukr.net](mailto:adsup@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>.

Семененко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74.

E-mail: [semenoi@i.ua](mailto:semenoi@i.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>.

Семененко Юрій Олександрович, асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74.

E-mail: [slider2012@i.ua](mailto:slider2012@i.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>.

---

Супрун Александр Данилович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057)730-10-74. E-mail: [adsup@ukr.net](mailto:adsup@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>.

---

Семененко Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057)730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>.

Семененко Юрий Александрович, ассистент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>.

Suprun Oleksandr Danylovych, Associate Professor, chair of electric power industry, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: adsup@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>.

Semenenko Oleksandr Ivanovyvch, Associate Professor, chair of electric power industry, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>.

Semenenko Yuriy Oleksandrovivch, Assistant, chair of electric power industry, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>.

Статтю прийнято 15.02.2018 р.

УДК 625.143.482

## ПАРАМЕТРИ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ У РІЗНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, кандидати техн. наук В. Г. Вітольберг, Д. О. Потапов

## ПАРАМЕТРЫ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ В РАЗНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

Д-р техн. наук И. Э. Мартынов, кандидаты техн. наук В. Г. Витольберг, Д. А. Потапов

## PARAMETERS OF RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE SHAPES IN DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

Dr. sc. sciences I. E. Martynov, phd. tehn. V. G. Vitolberg, D. O. Potapov

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127076

---

*Розглянуто роботу залізобетонних шпал марок Ш-1-1 і СБ-3-0 в умовах магістральних залізниць і колій незагального користування. Визначено основні експлуатаційні фактори, які впливають на їх роботу в колії. На основі даних обстеження залізобетонних шпал марки Ш-1-1 встановлено залежності їх виходу в непридатні. Запропоновано загальний підхід до прогнозування надійності роботи залізобетонних шпал марки СБ 3-0 на основі даних виходу шпал марки Ш-1-1. Отримано прогнозні залежності імовірності безвідмовної роботи шпал СБ 3-0 з використанням універсального двопараметричного розподілу Вейбулла. Визначено очікувані терміни служби шпал СБ 3-0 в різних експлуатаційних умовах.*

**Ключові слова:** колія, шпала, робота, надійність, відмови, напруження.

*Рассмотрена работа железобетонных шпал марок Ш-1-1 и СБ-3-0 в условиях магистральных железных дорог и путей необщего пользования. Определены основные эксплуатационные факторы, влияющие на их работу в пути. На основе данных*

обследования железобетонных шпал марки Ш-1-1 установлены зависимости их выхода в дефектные. Предложено общий подход к прогнозированию надежности работы железобетонных шпал марки СБ-3-0 на основе данных выхода в дефектные шпал марки Ш-1-1 в условиях путей необщего пользования. Предложены прогнозные зависимости вероятности безотказной работы шпал СБ-3-0 с использованием универсального двухпараметрического распределения Вейбулла. Определены прогнозные сроки службы шпал СБ 3-0 в различных эксплуатационных условиях.

**Ключевые слова:** путь, шпалы, работа, надежность, отказы, напряжения.

*The work of reinforced concrete sleepers of brands Sh-1-1 and SB-3-0 in the conditions of main railways and non-public roads is considered. The main operational factors influencing their work in the way are determined. Based on the survey data of reinforced concrete sleepers of brand Sh-1-1, which were removed from the tracks, the dependencies of their yield to defective ones were established, and the main groups of defects and damages were determined. A general approach is proposed for forecasting the reliability of the performance of concrete sleepers of the brand SB-3-0 on the basis of data on the yield of defective sleeper sh-1-1 in conditions of non-public roads, taking into account the possibility of changing these parameters, which is caused by the difference in the stressed state of sleepers of these brands. Taking into account the proposed approach, we propose predictive dependencies of the probability of failure-free operation of sleepers SB-3-0 under various operating conditions using the universal two-parameter Weibull distribution. On the basis of the proposed dependences of the probability of failure-free operation, the predicted service life of sleepers SB 3-0 is determined in various operating conditions.*

**Key words:** railwaytrack, sleepers, functioning, reliability, failures, stresses.

**Вступ.** При вивченні роботи елементів верхньої будови колії, у тому числі найбільш розповсюджених марок залізобетонних шпал марок Ш-1-1 і СБ-3-0, у різних експлуатаційних умовах важливу інформацію про характер їх роботи дає застосування теорії надійності.

Як відомо, шпали марки Ш-1-1 є одними з основних типів підрейкових опор на магістральних коліях залізниць України для ділянок із безстиковою конструкцією колії з проміжним рейковим скріпленням типу КБ. Проміжне рейкове скріплення типу КБ разом з рядом переваг має суттєві недоліки (велика кількість деталей, наявність різьбових з'єднань, що викликає необхідність у періодичному проведенні робіт з закріплення гайок клемних і закладних болтів та ін.), тому в якості реальної альтернативи зараз на магістральних коліях розширюється полігон укладання проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 на залізобетонних шпалах типу СБ-3-0. З іншого боку, беручи

до уваги перспективи укладання залізобетонних шпал СБ-3-0 в колії залізниць незагального користування, постає питання щодо адекватної оцінки їхнього експлуатаційного ресурсу та надійності їх роботи. Тому встановлення функції розподілу вірогідності безвідмовної роботи елементів колії дозволить отримати значення параметра потоку відмов, середнього часу безвідмовної роботи і ряд інших, що дасть змогу прогнозно оцінити роботу цього елемента верхньої будови колії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженнями ряду авторів [1-5] встановлені дефекти, при яких ремонт і використання залізобетонних шпал неможливі:

- а) поперечний злам шпали з розкриттям тріщин більше 1 мм або руйнування бетону в місцях зламу;
- б) поздовжні тріщини в бетоні з розкриттям більше 5 мм;
- в) відколи більше 30 % площі підрейкової площадки;

г) тріщини більше 5 мм, що проходять по торцях шпал;

д) руйнування бетону в підрейковій частині;

е) корозійні руйнування арматур усередині бетону з появою на поверхні шпали бурих плям, смуг або поздовжніх тріщин.

Під терміном «ураження шпал» розуміється кількість шпал, що мають дефекти, при яких можливе їх використання після ремонту. Факторів, що впливають на вихід і ураження шпал дефектами, багато. До них належать вантажонапруженість, осьові навантаження, швидкості руху, стан колії, ступінь засміченості баластного шару та ряд інших.

Можна припустити, що частина факторів, що впливають на вихід і ураження шпал, залежать від часу. Чим довше шпала лежить у колії, тим більше перепадів температур вона витримає, тим більше забруднювачів потрапить у баласт. Розлади колії також прогресують з часом, викликаючи залишкові деформації всієї колійної решітки. На відміну від факторів часу, від яких залежить вихід і ураження шпал, існують головні фактори, що викликають зношування й старіння шпал, – силові фактори, що відбуваються від впливу рухомого складу на колію.

Таким чином, на загальне ураження і вихід залізобетонних шпал впливають дві групи: силові фактори (вантажонапруженість, осьові навантаження, пропущений тоннаж) і фактори часу, до яких належать кількість перепадів температур, засмічення баласту, розлади колії та інше.

Дослідженнями [8, 9, 15] встановлено, що вплив швидкостей руху на вихід і ураження шпал на коліях незагального користування невеликий через невеликий діапазон зміни цих швидкостей (до 40 км/год).

Одним з критеріїв оцінки працездатності залізобетонних шпал СБ 3-0 в умовах колій незагального користування, окрім оцінки їх характеристик на міцність, є

надійність роботи. Використання апарату теорії надійності дозволяє визначити термін служби цих шпал у різних експлуатаційних умовах, прогнозувати роботу при повторному укладанні в колію.

Однак безпосереднє визначення показників надійності, встановлення залежностей вірогідності безвідмовної роботи шпал СБ 3-0 в умовах колій незагального користування теоретично неможливо, оскільки потребує довгострокового та масивного нагляду за роботою шпал у таких умовах, накоплення статистичних даних про вихід шпал у дефектні. Крім того, на сьогодні шпали СБ 3-0 використовуються тільки на магістральних коліях.

Шпали типу СБ 3-0 відрізняються від шпал типу Ш1-1 тільки конструкцією проміжного скріплення та способом прикріплення рейок чи підкладок – анкер при шпалах СБ 3-0 та закладні болти при шпалах Ш1-1. Дослідження [7, 10, 14], показали, що в умовах колій незагального користування напруження, які виникають у шпалах СБ 3-0, вище порівняно з напруженнями у шпалах марки Ш-1-1 на 12-16 % по середній верхній постелі та на 17-23 % по середній підрейковій площадці. В основному це відбувається за рахунок більш концентрованого прикладення вертикального та горизонтального поперечного навантаження.

Шпали типу Ш-1-1 застосовуються на залізницях незагального користування вже більше сорока років. Нормативний документ [6] рекомендує укладання цих шпал на ділянках колій з осьовим навантаженням до 300 кН та при річному перевезенні до 10 млн т. Однак в останні роки у зв'язку з високою ціною дерев'яних шпал шпали Ш-1-1 укладаються на ділянках з осьовим навантаженням до 500 кН та при будь-яких обсягах перевезень. До цього часу накопичено значний статистичний матеріал, який дозволяє отримати достовірні залежності вірогідності безвідмовної роботи цих шпал. Беручи до уваги

вищенаведене, можливо припустити, що використання інформації про надійність роботи шпал марки Ш-1-1 в різних експлуатаційних умовах дозволить оцінити основні показники надійності роботи шпал типу СБ 3-0.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є визначення терміну служби залізобетонних шпал типу СБ-3-0 з урахуванням особливостей їх напружено-деформованого стану в різних експлуатаційних умовах.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

1. Встановити залежності зміни інтенсивності потоку відмов залізобетонних шпал Ш-1-1 в дефектні.

2. Отримати залежності вірогідності безвідмовної роботи шпал СБ 3-0 з використанням універсального двопараметричного розподілу Вейбулла.

3. Визначити терміни служби шпал СБ 3-0 в різних експлуатаційних умовах за рахунок введення в розрахункові рівняння поправкових коефіцієнтів.

**Основна частина дослідження.** Застосовуючи як гіпотезу той або інший вид розподілу вірогідності безвідмовної роботи, ми часто наперед припускаємо характер зміни інтенсивності потоку відмов. Так наприклад, на рис. 1 наведено залежність зміни з часом інтенсивності потоку відмов при використанні розподілів Релея, експоненціального, усіченого нормального і рівномірного.

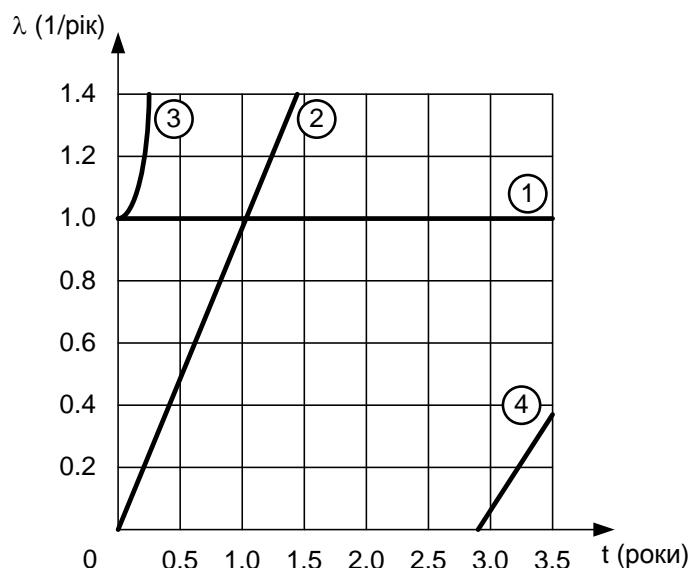


Рис. 1. Зміна інтенсивності потоку відмов:

1 – експоненціальний розподіл; 2 – розподіл Релея;  
3 – усічений нормальний розподіл; 4 – рівномірний розподіл

Але спостереження за роботою залізобетонних шпал при різних осьових навантаженнях показують, що інтенсивність потоку відмов у деяких випадках істотно відрізняється від залежності, наведеної на рис. 1.

У зв'язку з цим доцільно застосувати розподіл Вейбулла [13, 16] як гіпотезу вірогідності безвідмовної роботи.

$$P(t) = e^{-\frac{t^m}{x_0}}, \quad (1)$$

де  $m$  і  $x_0$  – параметри розподілу;  
 $t$  – параметр часу.

Параметр потоку відмов у цьому розподілі можна отримати використовуючи співвідношення:

$$a(t) = -P'(t), \quad (2)$$

що для розподілу Вейбулла можна визначити як

$$a(t) = \frac{m}{x_0} t^{m-1} e^{-\frac{t^m}{x_0}}. \quad (3)$$

Тоді, використовуючи залежність між параметром потоку відмов, функцією розподілу  $P(t)$  і інтенсивністю потоку відмов  $\lambda(t)$ :

$$a(t) = \lambda(t)P(t), \quad (4)$$

отримаємо залежність зміни інтенсивності потоку відмов з часом:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{m}{x_0} t^{m-1}. \quad (5)$$

Таким чином, використання розподілу Вейбулла дозволяє більш точно судити про характер роботи елементів колії в різних умовах експлуатації.

Викладені вище міркування були використані при вивченні роботи залізобетонних шпал типу Ш-1-1 на коліях підприємств чорної металургії при значеннях осьових навантажень від 200 до 450 кН/вісь і більше. Параметри  $m$  і  $x_0$  в розподілі Вейбулла були отримані методом найменших квадратів на підставі даних обстежень.

$$m = \frac{\sum \ln t \cdot \sum \ln(-\ln P(t)) - \sum \ln t \ln(-\ln P(t))}{\sum (\ln t)^2 - (\sum \ln t)^2},$$

$$\ln x_0 = m \sum \ln t - \sum \ln(-\ln P(t)), \quad (6)$$

де  $\hat{P}(t)$  – статистичний показник вірогідності безвідмовної роботи,

$$\hat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N(0)}, \quad (7)$$

де  $N(0)$  – кількість шпал, придатних у момент часу  $t$ ;

$n(t)$  – кількість шпал, що вийшли з ладу до моменту часу  $t$ .

Отримані значення параметрів  $m$  і  $x_0$  для ділянок з різними осьовими навантаженнями наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення параметрів в розподілі Вейбулла

Осьові навантаження, кН/вісь	$m$	$x_0$
>450	4,72	$16,82 \cdot 10^5$
291–450	2,87	$30,92 \cdot 10^4$
251–290	1,17	330,25
<250	0,24	254,56
Магістральні колії, $P_{oc} < 230$	0,95	355,27



Тут же надані значення параметрів, отриманих для колій магістральних залізниць з осьовими навантаженнями до 230 кН/вісь при відповідних значеннях вантажонапруженості.

Вплив швидкостей руху не враховувався. Параметри  $m$  і  $x_0$  отримані на

підставі даних досліджень, проведених у роботах [10, 17].

На рис. 2 наведені криві залежності інтенсивності потоку відмов від часу для колій з осьовими навантаженнями, вказаними в табл. 1.

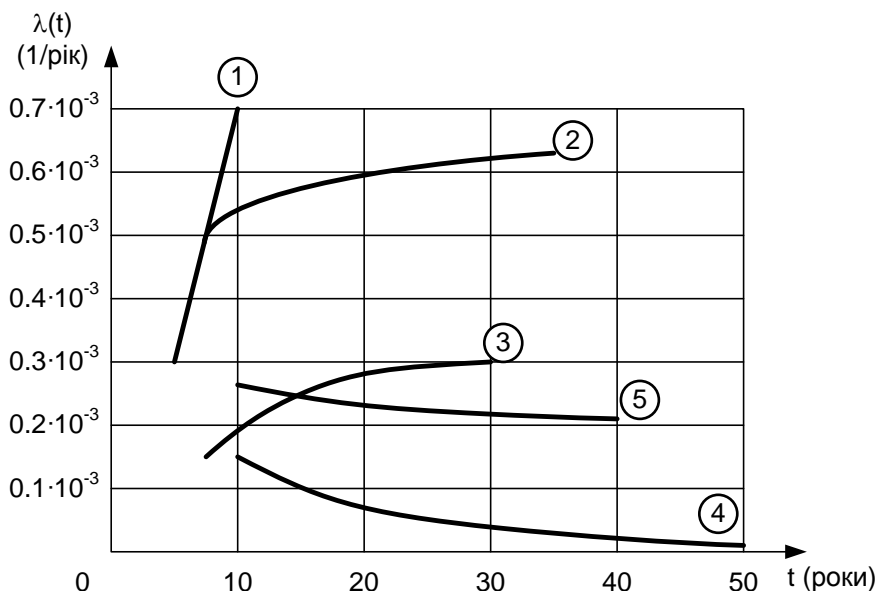


Рис. 2. Інтенсивність потоку відмов залізобетонних шпал типу Ш-1-1:

- 1 – колії підприємств чорної металургії  $P_{oc} > 450$  кН/вісь;
- 2 – колії підприємств чорної металургії  $P_{oc} = 291-450$  кН/вісь;
- 3 – колії підприємств чорної металургії  $P_{oc} = 251-290$  кН/вісь;
- 4 – колії підприємств чорної металургії  $P_{oc} < 250$  кН/вісь;
- 5 – колії магістральних залізниць  $P_{oc} < 230$  кН/вісь

Крім того, багаторічні спостереження за роботою залізобетонних шпал марки Ш-1-1 в магістральних коліях і в умовах залізниць незагального користування дозволили отримати кількісні показники (із подальшою апроксимацією) щодо виходу їх у дефектні. Отримані залежності наведені в табл. 2 для прямих ділянок колій. Залежності конкретизовані по діапазонах осьових навантажень, що відповідають даній категорії колій. Статистична обробка результатів спостережень виконана за загальноприйнятою методикою [13, 16] з

метою встановлення коефіцієнтів кореляції й величини довірчого інтервалу.

Отримані значення коефіцієнтів кореляції наведені в п'ятому стовпці табл. 2. Їхні величини досить прийнятні, однак значущість їх повинна бути перевірена. Перевірка здійснюється множенням отриманої величини на  $\sqrt{n-1}$ , де  $n$  – кількість спостережень. Значення  $r\sqrt{n-1}$  порівнюються з табличною величиною критичного значення [13]. Таблична величина критичного значення при надійності висновку  $P=0,99$  наведена в сьомому стовпці табл. 2.

Залежності виходу та ураження залізобетонних шпал Ш-1-1

Категорія колії	Осьові навантаження, т/вісь	Залежність	$n$	$r$	$r\sqrt{n-1}$	Табличне значення при $P = 0,99$	Довірчий інтервал $C$
1	2	3	4	5	6	7	8
ВНК	>35	$y=0,577 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	23	0,544	2,552	2,47	0,011
		$z=1,567 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	23	0,530	2,486	2,47	0,009
	25-35	$y=0,539 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	13	0,710	2,459	2,37	0,010
		$z=1,496 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	13	0,695	2,409	2,37	0,012
	<25	$y=0,497 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	31	0,464	2,541	2,49	0,011
		$z=1,424 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	31	0,460	2,519	2,49	0,012
I	$\geq 25$	$y=0,434 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	40	0,425	2,654	2,51	0,012
		$z=1,049 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	40	0,415	2,592	2,51	0,090
	<25	$y=0,392 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	30	0,417	2,663	2,49	0,090
		$z=0,953 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	30	0,414	2,643	2,49	0,010
II	<25	$y=0,161 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	36	0,433	2,561	2,50	0,010
		$z=0,440 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	36	0,428	2,532	2,50	0,011

Отримані значення  $r\sqrt{n-1}$  виявляються у всіх випадках більше критичних значень. Отже, досліджувані величини корелюються.

Для визначення ступеня точності отриманих залежностей були обчислені значення довірчого інтервалу за формулою

$$C = f(p, n) \frac{S}{n}, \quad (8)$$

де  $S$  – середньоквадратичне відхилення.

Отримані значення довірчого інтервалу наведені у восьмому стовпці табл. 2. Вони становлять від 7 до 14 % середніх значень параметрів  $y$  і  $z$ .

Коефіцієнт  $K$ , що враховує вплив кривих на вихід і ураження залізобетонних шпал, емпірично визначений як

$$K = 1 + \frac{m}{R}, \quad (9)$$

де  $R$  – радіус кривої, м;

$m$  – параметр формули, визначений методом найменших квадратів.

У результаті обчислень отримано такі значення виразу (9) для колій різних категорій:

- для позакатегорійних колій  $K = 1 + \frac{106,5}{R}$ ;
- для колій першої категорії  $K = 1 + \frac{84,0}{R}$ ;
- для колій другої категорії  $K = 1 + \frac{63,0}{R}$ .

Для визначення термінів служби залізобетонних шпал типу СБ 3-0 скористаємося отриманими залежностями виходу шпал типу Ш-1-1 з урахуванням їх коригування та апаратом теорії надійності.

Під безвідмовністю роботи якогось пристрою розуміють властивість цього пристрою зберігати працездатність протягом заданого інтервалу часу в певних умовах експлуатації. Імовірність безвідмовної роботи – імовірність того, що пристрій буде працювати безвідмовно протягом необхідного інтервалу часу  $t_0$ .

$$P(t_0) = 1 - F(t_0), \quad (10)$$

де  $F(t_0)$  – функція розподілу випадкової величини  $\Theta$ , а  $\Theta$  – випадкова тривалість часу безвідмовної роботи пристрою до появи відмови.

Статистичне визначення ймовірності безвідмовної роботи [13, 16]

$$P\hat{(t_0)} = 1 - \frac{n(t_0)}{N(0)}, \quad (11)$$

де  $N(0)$  – кількість пристроїв, справних у початковий момент часу  $t=0$ ;

$n(t_0)$  – кількість пристроїв, що відмовили до моменту часу  $t_0$ .

Для залізобетонних шпал марки СБ 3-0 відношення  $\frac{n(t_0)}{N(0)}$  можна представити у вигляді

$$\frac{n(t_0)}{N(0)} = \frac{y \cdot T \cdot K \cdot K_t}{100}, \quad (12)$$

де  $y$  – питомий вихід залізобетонних шпал, %/млн т;

$T$  – пропущений тоннаж, млн т;

$K$  – коефіцієнт, що враховує кривизну ділянки;

$K_t$  – коефіцієнт, який враховує тип шпали, або

$$\frac{n(t_0)}{N(0)} = \frac{at^2T}{100} = \frac{at^3T_0 \cdot K \cdot K_t}{100},$$

де  $T_0$  – річні перевезення по ділянці, млн т/р.;

$t$  – час перебування шпал у колії, р.

$$\frac{aT \cdot K \cdot K_t}{100} = b,$$

тоді

$$P\hat{(t)} = 1 - bt^3. \quad (13)$$

Відмова колії в частині роботи залізобетонних шпал відбудеться в тому випадку, коли в колії буде три й більше несправних залізобетонних шпали. Тоді ймовірність безвідмовної роботи залізобетонних шпал як системи з паралельно з'єднаними елементами [13, 16], можна визначити за формулою

$$P_c\hat{(t)} = [1 - (1 - P\hat{(t)})^3], \quad (14)$$

де  $P\hat{(t)}$  – ймовірність безвідмовної роботи одного елемента (шпали).

З урахуванням виразу (13) отримаємо

$$P_c\hat{(t)} = [1 - (1 - bt^3)^3]. \quad (15)$$

Як розподіл ймовірності безвідмовної роботи системи залізобетонних шпал використовуємо розподіл Вейбулла як найбільш універсальний [13, 16]:

$$P_c(t) = \lambda^{-x_0} e^{-t^m}. \quad (16)$$

Параметри  $m$  і  $x_0$  у цьому розподілі визначимо методом найменших квадратів. Отримані величини  $m$  і  $x_0$  наведені в табл. 3.

Перевірка гіпотези про характер закону розподілу ймовірності безвідмовної роботи виконана за критерієм Колмогорова.

Середній термін служби залізобетонних шпал визначається за формулою

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt$$

або

$$T = x^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right), \quad (17)$$

де  $\Gamma(x)$  – табульована гамма-функція Ейлера.

Таблиця 3

Значення величин  $m$  і  $x_0$ 

Категорія колії	Осьові навантаження, т	Вантажонапруженість, млн т/р.	Час перебування в колії, р.	Залежність виходу шпал у	$b$	$m$	$x_0$
ВНК	35	–	7	$0,577 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	$26,62 \cdot 10^{-5}$	4,21	$15,83 \cdot 10^5$
	25-35	10	12	$0,535 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	$5,73 \cdot 10^{-5}$	0,95	3639,41
		10-15	10		$8,09 \cdot 10^{-5}$	1,31	12572,53
15	7	$16,18 \cdot 10^{-5}$	2,62	$31,92 \cdot 10^4$			
I	25	10-15	15	$0,497 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	$3,25 \cdot 10^{-5}$	0,59	1294,37
	15	12	$5,87 \cdot 10^{-5}$		0,97	3552,78	
	25	–	12	$0,434 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	$7,15 \cdot 10^{-5}$	1,17	330,25
I	25	5-10	20	$0,392 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	$1,76 \cdot 10^{-5}$	0,34	677,25
		10	18		$2,17 \cdot 10^{-5}$	0,49	677,25
II	25	–	30	$0,161 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$	$0,59 \cdot 10^{-5}$	0,12	123,80
		5	24		$1,02 \cdot 10^{-5}$	0,24	254,56

Розрахунок середнього терміну служби залізобетонних шпал  $T$  для різних умов експлуатації наведений у табл. 4 (шостий стовпець). У сьомому стовпці наведені терміни служби колії до капітального ремонту. У восьмому – відношення

можливого середнього терміну служби к терміну служби до капітального ремонту. Як видно з табл. 4, залізобетонні шпали можуть перебувати в колії 2-3 міжремонтних термінів.

Таблиця 4

Результати розрахунків середнього терміну служби залізобетонних шпал марки Сб-3-0

Категорія колії	Осьові навантаження, т/вісь	Вантажонапруженість, млн т/р.	$m$	$x_0$	$T$ , р.	Термін служби до капітального ремонту $T_0$ , р.	$\frac{T}{T_0}$
1	2	3	4	5	6	7	8
ВНК	>35	–	4,21	$15,83 \cdot 10^5$	15,3	7	2,19
	25-35	<10	0,95	$36,39 \cdot 10^2$	40,2	12	3,35
		10-15	1,31	$12,57 \cdot 10^3$	31,8	10	3,18
		>15	2,62	$31,92 \cdot 10^4$	19,3	7	2,75
I	<25	10-15	0,59	$12,94 \cdot 10^2$	51,8	15	3,45
		>15	0,97	$35,52 \cdot 10^2$	39,6	12	3,30
I	<25	–	1,17	$32,32 \cdot 10^2$	42,6	12	3,28
		5-10	0,34	$3,30 \cdot 10^2$	71,0	20	3,55
II	<25	>10	0,49	$6,77 \cdot 10^2$	62,6	18	3,48
		–	0,12	$1,23 \cdot 10^2$	110,4	30	3,68
II	<25	5	0,24	$2,54 \cdot 10^2$	86,6	24	3,61

**Висновки:**

1. Отримані залежності зміни інтенсивності потоку відмов підтвердили припущення про те, що величина осьових навантажень має істотний вплив на характер виходу залізобетонних шпал у дефектні.

2. Запропоновано загальний підхід до прогнозування надійності роботи залізобетонних шпал типу СБ 3-0 на основі даних по виходу та шпал типу Ш-1-1 в умовах колій незагального користування з урахуванням можливості зміни цих параметрів, які обумовлені різницями напруженого стану шпал цих типів.

3. На основі даних обстеження залізобетонних шпал марок Ш-1-1 встановлено залежності виходу в непридатні та загальні ураження шпал дефектами залежно від експлуатаційних умов – осьове навантаження, річні

перевезення, радіуси кривих. Крім головних факторів – силових, враховано також фактор часу знаходження шпал у колії, природні та кліматичні впливи на шпали – кількість циклів заморожування-відтавання, корозійного впливу та ін.

4. З урахуванням запропонованого підходу до прогнозування надійності роботи шпал типу СБ 3-0 в різних експлуатаційних умовах запропоновано прогнозні залежності вірогідності безвідмовної роботи шпал СБ 3-0 з використанням універсального двопараметричного розподілу Вейбулла.

5. На основі запропонованих прогнозних залежностей вірогідності безвідмовної роботи визначено очікувані терміни служби шпал СБ 3-0 у різних експлуатаційних умовах. Можливо припустити, що термін служби цих шпал складає не менше двох нормативних міжремонтних термінів.

*Список використаних джерел*

1. Железобетонные шпалы для рельсового пути [Текст] / под ред. А. Ф. Золотарского. – М. : Транспорт, 1981. – 265 с.
2. Андриевский, М. Г. Дефекты железобетонных шпал и причины их появления [Текст] / М. Г. Андриевский, К. А. Александров. – Ташкент : УзИНТИ, 1966. – С. 17-21.
3. Ангелейко, В. И. Накопление дефектов от воздействия подвижной нагрузки в железобетонных шпалах [Текст] / В. И. Ангелейко // Труды ДИИТа. – Днепропетровск, 1981. – Вып. 209. – С. 35-39.
4. Даніленко, Е. І. Залізнична колія [Текст]: підруч. для вищ. навч. закл. / Е. І. Даніленко. – К. : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
5. Railway construction [Text] / Sz. Fisher, B. Eller, Z. Kada, A. Németh // Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 2015. – 334 p.
6. Ангелейко, В. И. Разработка системы повторного использования железобетонных шпал на предприятиях Минчермета СССР [Текст]: отчет по НИР / В. И. Ангелейко, А. Н. Даренский. – № 01830039004. – Харьков : ХИИТ, 1985. – 85 с.
7. Даренский, А. Н. Сопротивление промежуточных скреплений КБ и КПП–5 перемещениям рельсов в продольной плоскости [Текст] / А. Н. Даренский, В. Г. Витольберг // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – 2008. – № 14. – С. 142-152.
8. Даренський О.М. Експериментальне визначення опорних сил скреплень КБ і КПП – 5 перемещенням рельсів в продольній площині [Текст] / О.М. Даренський, В.Г. Витольберг // ДонІЗТ Збірник наукових праць. – 2008.- № 15. -С. 112-124.
9. Даренский, А. Н. Результаты экспериментальных работ по определению сил сопротивления железобетонных шпал продольным перемещениям [Текст] / А. Н. Даренский, В. Г. Витольберг, Н. В. Бугаец // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – 2009. – № 17. – С. 157-171.

10. Вітольберг, В. Г. Особливості опору залізобетонних шпал СБ 3-0 поздовжнім зсувам на коліях промислових залізниць [Текст] / В. Г. Вітольберг // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2012. – № 4 (175). – С. 53-58.
11. ДБН В.2.3-19-2008. Споруди транспорту залізничні колії 1520 мм. Норми проектування [Текст] / Мінрегіонбуд України. – К., 2008. – 134 с.
12. СНиП 2.05.07-91 Споруди транспорту. Промисловий транспорт [Текст]. – К., 1991. – 54 с.
13. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности [Текст] / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М. : Наука, 1965. – 524 с.
14. Даренский, А. Н. Надежность работы железобетонных шпал на путях Минчермета СССР [Текст] : деп. рукопись / А. Н. Даренский. – рукопись деп. в ЦНИИТЭИ МПС 28.11.86, № 3534.
15. Ангелейко, В. И. Железнодорожный путь и станции промышленных предприятий [Текст] / В. И. Ангелейко, В. И. Дмитриев, А. Н. Перцев. – К. : Вища школа, 1980. – 184 с.
16. Бондаренко, І. О. Надійність залізничної колії [Текст]: навч. посібник / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, М. А. Арбузов; [Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. Лазаряна]. – Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2015. – 156 с.
17. Meli, E. An innovative wheel–rail contact model for railway vehicles under degraded adhesion conditions [Text] / E. Meli, A. Ridolfi //Multibody System Dynamics. – 2015. – Т. 33. – № 3. – С. 285-313.

---

Мартинов Ігор Ернстович, доктор технічних наук, професор кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: vagoni@kart.edu.ua.

Вітольберг Володимир Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Потапов Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-60. E-mail: potapov@kart.edu.ua.

Мартынов Игорь Эрнстович, доктор технических наук, профессор кафедры вагонов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. : (057) 730-10-35. E-mail: vagoni@kart.edu.ua.

Витольберг Владимир Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. : (057) 730-10-60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Потапов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. : (057) 730-10-60. E-mail: potapov@kart.edu.ua.

Igor Martynov, Dr. Sc. Science, Department of railway carriages Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-13. E-mail: info@kart.edu.ua.

Vladimir Vitolberg, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Track and Track Facilities Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-60. E-mail: vitolberg@kart.edu.ua.

Dmitry Potapov, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Track and Track Facilities Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-60. E-mail: potapov@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 18.02.2018 р.

УДК 625.42

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ КОСТИЛІВ І ШУРУПІВ ПРИ ВИСМИКУВАННІ З ДЕРЕВ'ЯНОЇ ШПАЛИ, ВІДНОВЛЕНОЇ ПОЛІМЕРОМ**

Канд. техн. наук Д. А. Фаст, старші викладачі О. В. Корнієнко, А. А. Савін, слухач Є. А. Христенко

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОСТЫЛЕЙ И ШУРУПОВ ПРИ ВЫДЕРГИВАНИИ ИЗ ДЕРЕВЯННОЙ ШПАЛЫ, ВОССТАНОВЛЕННОЙ ПОЛИМЕРОМ**

Канд. техн. наук Д. А. Фаст, старшие преподаватели О. В. Корниенко, А. А. Савин, слушатель Е. А. Христенко

**RESEARCH OF RESISTANCE OF SPIKES AND SCREWS WHILE PULLING FROM WOODEN SLEEPER RESTORED BY POLYMER**

Associate professor D. A. Fast, senior lecturer O. V. Korniienko, A. A. Savin, listener Y. A. Khrystenko

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127081

---

*Для дослідження роботи проміжних скріплень (костилів і шурупів) у дослідних дерев'яних шпалах, відновлених полімерними матеріалами, було проведено випробування їх на висмикування. Отримані результати підтверджують доцільність використання пластмаси акрилової самотвердної АСТ-Т для відновлення експлуатаційних властивостей дерев'яних шпал, які перебувають у процесі експлуатації в тунелі метрополітену.*

**Ключові слова:** *дерев'яна шпала метрополітену, костиль, шуруп, полімер, опір висмикуванню.*

*Для исследования работы промежуточных креплений (костылей и шурупов) в опытных деревянных шпалах, восстановленных полимерными материалами, было проведено испытание их на выдергивание. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования пластмассы акриловой самотвердеющей АСТ-Т для восстановления эксплуатационных свойств деревянных шпал, которые находятся в процессе эксплуатации в тоннеле метрополитена.*

**Ключевые слова:** *деревянная шпала метрополитена, костыль, шуруп, полимер, сопротивление выдергиванию.*

*On the railways, the main part of wooden sleepers replaced with reinforced concrete. They have longer service lives, provide a constant track width, are less exposed to atmospheric influences and require lower maintenance costs. But under exploitation in underground tunnels, where the ballast under the rail-sleepers grid is a monolithic concrete foundation, the use of reinforced sleepers is complicated by increased rigidity of the base. Therefore, for the subway the most effective is the construction of the track on wooden sleepers.*

*The main distinctive feature of the operation of wooden sleepers in the subway is that they are drowned in the road concrete and, in this connection, replacing them with new ones is a rather complicated and expensive operation, which requires considerable expenses for manual labor and costs. Therefore, there is a need to restore their operational properties without removing from track*

concrete, which can be done using the use of polymer materials. To study the work of intermediate fasteners (spikes and screws) in experienced wooden sleepers, restored with polymeric materials, they were tested for pulling. The obtained results confirm the expediency of using acrylic self-hardening acoustical AST-T plastic for restoration of operational properties of wooden sleepers that are in use in the subway tunnel.

The purpose is to investigate the bearing capacity of intermediate fasteners, namely, spikes and screws, when pulling out of the wooden sleepers of the underground, which is restored with polymer materials. The objectives of the research are to determine the amount of effort that must be applied to the spikes and screw to pull them out of wooden sleepers, restored with polymer materials. Compare the results with the magnitude of effort when pulling out of a solid wooden sleepers, as well as with previous studies.

**Key words:** wooden sleeper of subway, spike, screw, polymer, resistance of pulling.

**Вступ.** У великих містах найбільш зручний і економічний вид пасажирського транспорту – підземні залізниці, найважливішою перевагою яких є велика швидкість перевезення та здатність освоювати масові пасажиропотоки. Очевидні переваги підземного громадського транспорту створюють передумови для його безперервного розвитку та удосконалення.

На магістральних ділянках залізниць основну частину дерев'яних шпал замінено залізобетонними. Вони мають більші терміни служби, забезпечують постійну ширину колії, менше піддаються атмосферним впливам і вимагають менших витрат на утримання. Але в умовах експлуатації в тунелях метрополітену, де баластом під рейко-шпальну решітку є монолітна бетонна основа, використання залізобетонних шпал ускладнюється збільшеною жорсткістю основи. Тому для метрополітену найбільш ефективною є конструкція колії на дерев'яних шпалах [1, 2].

Основна відмінна риса експлуатації дерев'яних шпал у метрополітені – вони утоплені в колійний бетон, і у зв'язку з цим заміна їх новими є досить складною й дорогою операцією, що вимагає значних витрат ручної праці й коштів [3]. Тому необхідно відновлювати їхні експлуатаційні властивості без вилучення з колійного бетону, що можна зробити за допомогою використання полімерних матеріалів. Для дослідження роботи проміжних скріплень (костилів і шурупів) у дерев'яних шпалах, відновлених полімерними матеріалами,

було проведено випробування їх на висмикування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В основному дослідження направлені на удосконалення зони проміжного скріплення, а також пошук нових конструкцій підрейкової основи [2]. Існують способи ремонту дерев'яних шпал з вилученням їх з колійного бетону [4], а також заходи з запобігання та боротьби з гниттям деревини [5]. Проведено дослідження несучої здатності костилів і шурупів для таких полімерних матеріалів, як епоксидна смола з різними наповнювачами та резорциновий розчин [6, 7]. На підставі проведеного аналізу останніх досліджень можна зробити висновок, що не було проведено досліджень шурупів на висмикування з дерев'яної шпали, відновленої акриловою пластмасою самотвердною АСТ-Т.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою є дослідження несучої здатності проміжних скріплень, а саме костилів і шурупів, при висмикуванні з дерев'яної шпали метрополітену, яка відновлена полімерними матеріалами. Завданнями досліджень є визначення величини зусилля, яке необхідно прикласти до костиля й шурупа, щоб висмикнути їх з дерев'яної шпали, відновленої полімерними матеріалами; порівняння отриманих результатів з величинами зусиль при висмикуванні з суцільної дерев'яної шпали, а також з виконаними раніше дослідженнями.



**Основна частина дослідження.** Для дослідження роботи проміжних скріплень (костилів і шурупів) у дослідних дерев'яних шпалах, відновлених полімерними матеріалами, було проведено випробування їх на висмикування.

У шпалах, заповнених трикомпонентною сполукою клею ЕД-20 із затверджувачем ПЕПА + ІКС (інден-кумаронова смола) + розчинник № 647, досліджувалася

робота костилів і шурупів, а в шпалах, заповнених пластмасою акриловою самотвердною АСТ-Т, випробувалися на висмикування тільки шурупи.

Конструкція кріплення шпали для випробувань костилів і шурупів показана на рисунку. Дана конструкція призначена для закріплення зразків шпал із вбитими костилями або вкрученими шурупами при випробуванні їх на висмикування.

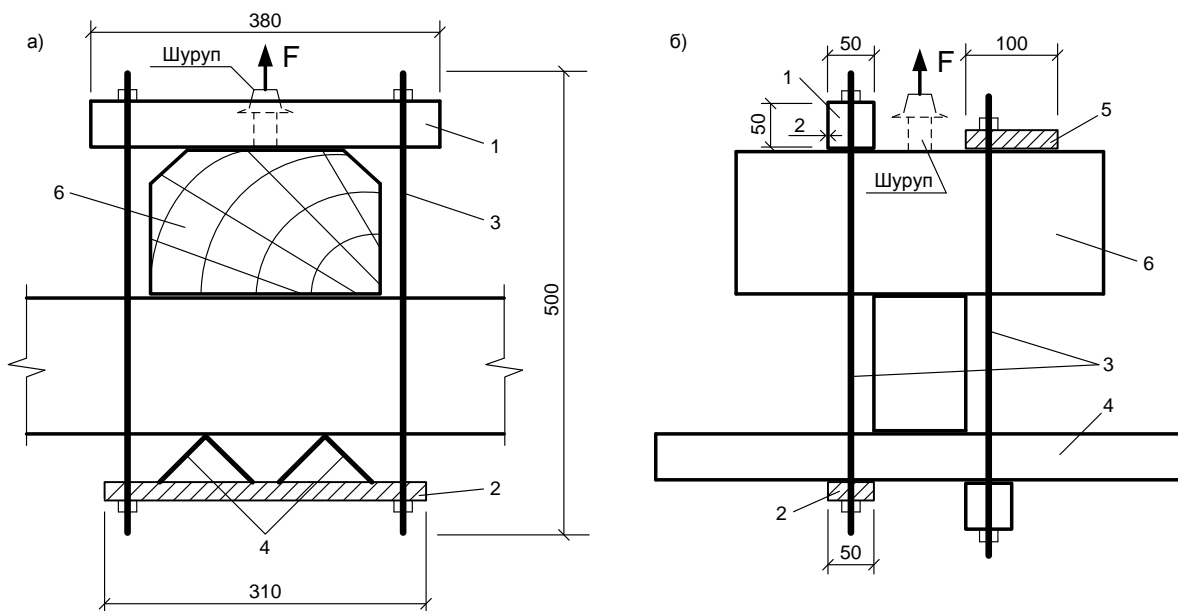


Рис. Схема конструкції кріплення шпали для випробування костилів і шурупів на висмикування: а – вигляд спереду; б – вигляд збоку; 1 – квадратна труба 50×50×2 (l = 380 мм); 2 – сталеві смуга 15×50 (l = 310 мм); 3 – металеві стрижні  $\varnothing$  8 (l = 500 мм); 4 – кутик 56×56×5 (l = 800 мм); 5 – сталеві смуга 20×100 (l = 310 мм); 6 – зразок шпали

У процесі досліджень елементів скріплення на опір при висмикуванні зі шпал, заповнених трикомпонентною сполукою клею ЕД-20 із затверджувачем ПЕПА + ІКС + розчинник № 647, було випробувано 7 костилів (середнє навантаження на висмикування складо 11 кН, максимальне – 14 кН) і 3 шурупи (середнє навантаження на висмикування – 28 кН, максимальне – 44 кН), а також зі шпал, наповнених акриловою композицією, було випробувано тільки 2 шурупи (для шурупа,

який був вставлений при заливанні рідкого полімерного розчину, і для шурупа, який було вкручено у просвердлений отвір діаметром 16 мм у затверділому полімерному матеріалі, опір висмикуванню склав більше 50 кН). Зусилля висмикуванню змінювалося залежно від ступеня трохлості деревини шпал, ступеня заповнення деревини полімером і товщини самого полімерного шару, через який проходили костилі й шурупи. Результати зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати випробувань костилів і шурупів на висмикування

Номер з/п	Вид полімерного матеріалу заповнювача шпали	Максимальне зусилля при висмикуванні, кН
1	Випробування костилів на висмикування з трикомпонентною сполукою клею ЕД-20 із затверджувачем ПЕПА + ІКС + розчинник № 647	14
2		13,5
3		12,6
4		8
5		10,6
6		7,5
7		11,1
1	Випробування шурупів на висмикування з трикомпонентною сполукою клею ЕД-20 із затверджувачем ПЕПА + ІКС + розчинник № 647	44
2		22
3		17,5
1	Випробування шурупів на висмикування з пластмасою акриловою самотвердною АСТ-Т	більше 50
2		більше 50

Порівнюючи отримані результати з даними, наведеними в табл. 2 і 3, можна зробити висновок, що підвищення ступеня трохлості знижує опір висмикуванню, а

наявність шарів полімеру, через які проходять костилі й шурупи, збільшує їх зчеплення, у результаті чого збільшується зусилля для висмикування.

Таблиця 2

Результати випробувань при висмикуванні й бічному відтисканні костилів [6]

Зміцнюючий розчин	Зусилля при висмикуванні		Деформація деревини, мм, при бічному відтисканні при навантаженнях*, кН			
	кН	%	1	2	3	4
Без зміцнення	8,44	100	0,24/100	0,33/100	0,51/100	0,69/100
Епоксидний	28,18	355	0,16/64,5	0,36/109	0,61/119,5	-
Резорциновий без наповнювача	21,79	258	0,05/20,1	0,16/48,5	0,32/62,8	0,55/79,4
Резорциновий з наповнювачем	24,58	291	0,07/29,2	0,17/51,5	0,34/66,8	0,51/74

Примітка. \* У чисельнику показано деформацію в міліметрах, у знаменнику – у відсотках.

Таблиця 3

Результати випробувань при висмикуванні й бічному відтисканні шурупів [7]

Варіанти зміцнення	Зусилля при висмикуванні, кН			Середнє значення зусилля при висмикуванні, кН
	№ півшпал			
	I	II	III	
Шурупи, залиті сполуками: епоксидна смола + кварцове борошно	44	36,25	40	40
епоксидна смола + ПН-1	44	37,5	46	40
епоксидна смола + феноло-формальдегідна	52,5	44	51,5	49,25
Контрольні шурупи без зміцнюючого розчину	33	31	34,75	33,25

**Висновки.** Костилі, що забиваються безпосередньо в деревину шпали, руйнують її волокна. Опір висмикуванню й відтисканню костилів в нових соснових шпалах при попередньому просвердлюванні в них отворів для костилів діаметром 12,5 мм на 20–30 % вище, ніж опір костилів, забитих без попереднього просвердлювання. У середньому опір висмикуванню костилів з нової соснової шпали становить 20 кН, а зі шпал більш твердих порід (дуб, бук) – до 35 кН. Опір відтисканню становить близько  $\frac{3}{4}$  опору висмикуванню при відтисканні до 5 мм (для нових соснових шпал). Шурупи, що

застосовуються в якості прикріплювачів, завдяки гвинтовій нарізці чинять опір висмикуванню в 1,5–2 рази сильніше, ніж костилі, тобто 30–40 кН для соснових шпал і 50–70 кН для шпал більш твердих порід. Однак їх опір відтисканню менше, ніж опір костилів (50–60 % опору останніх).

Отримані результати випробувань шурупів на висмикування підтверджують доцільність використання пластмаси акрилової самотвердної АСТ-Т для відновлення експлуатаційних властивостей дерев'яних шпал, які перебувають у процесі експлуатації в тунелі метрополітену.

### Список використаних джерел

1. Жильцов, В. Н. Устройство и содержание пути Московского метрополитена [Текст] / В. Н. Жильцов, Е. Т. Мосин. – М. : Трансжелдориздат, 1960. – 296 с.
2. Кравченко, Н. Д. Новые конструкции железнодорожного пути для метрополитенов [Текст] / Н. Д. Кравченко. – М. : Транспорт, 1994. – 143 с.
3. Технологічний процес заміни дерев'яних шпал у тунелі. Служба колії і тунельних споруд Київського метрополітену [Текст]. – К., 2001. – 11 с.
4. Троицкий, Н. Д. Вопросы продления срока службы деревянных шпал [Текст] / Н. Д. Троицкий // Труды ВНИИЖТ. – 1958. – № 150. – С. 55-70.
5. Попов, В. В. Гниение шпал в пути и меры борьбы с ним [Текст] / В. В. Попов. – М. : Транспорт, 1967. – 132 с.
6. Рыжова, З. А. Полимерные составы для упрочнения древесины шпал в зоне расположения костыльных крепежителей [Текст] / З. А. Рыжова, П. С. Гайдамака, С. М. Генкин // Использование полимерных материалов при ремонте подвижного состава и пути : труды ЦНИИ. – М. : Транспорт, 1978. – С. 85–87.

7. Рыжова, З. А. Упрочнение древесины шпал в зоне прикрепителей рельсовых скреплений [Текст] / З. А. Рыжова, П. С. Гайдамака, И. П. Ситковский [и др.] // Исследование полимеров для железнодорожного транспорта : труды ЦНИИ. – М. : Транспорт, 1968. – С. 11–16.
8. Фаст, Д. А. Несущая способность деревянных брусьев, пропитанных полимерным раствором [Текст] / Д. А. Фаст // Ресурсосберегающие технологии строительных и композиционных материалов: сб. докладов. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2007. – С. 287–290.
9. Фаст, Д. А. Продление срока службы деревянных шпал путем пропитки их полимерным составом АСТ-Т [Текст] / Д. А. Фаст, С. А. Почепецкий // Удосконалення конструкції залізничної колії та системи ведення колійного господарства: зб. наук. праць. – Харьков : УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 91. – С. 43–48.
10. Фаст, Д. А. Восстановление эксплуатационных свойств деревянных шпал метрополитена, частично лежащих на бетонном основании, без изъятия их из пути [Текст] / Д. А. Фаст, В. П. Шраменко // Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства: материалы III междунар. науч.-техн. интернет-конф., 15.04-15.05.2012 г.: сб. тезисов. – Харьков: ХГАГХ, 2012. – С. 70–71.
11. Research into parameters of energy loss when trains influence the track with wooden sleepers [Text] / Yusef Tuley, Natalia Bugaets, Alina Malishevskay // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2016. – Вип. 6(84). – № 1. – С. 9-13.

---

Фаст Денис Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-59. E-mail: denia008@ukr.net.  
Корнієнко Олег Вікторович, старший викладач кафедри озброєння та стрільби інженерно-технічного факультету Національної академії Національної гвардії України.  
Савін Андрій Андрійович, старший викладач кафедри управління повсякденною діяльністю командно-штабного факультету Національної академії Національної гвардії України.  
Христенко Євгеній Анатолійович, слухач інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації Українського державного університету залізничного транспорту.

Фаст Денис Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-59. E-mail: denia008@ukr.net.  
Корниенко Олег Викторович, старший преподаватель кафедры вооружения и стрельбы инженерно-технического факультета Национальной академии Национальной гвардии Украины.  
Савин Андрей Андреевич, старший преподаватель кафедры управления повседневной деятельностью командно-штабного факультета Национальной академии Национальной гвардии Украины.  
Христенко Евгений Анатольевич, слушатель института переподготовки и повышения квалификации Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Fast Denis Andreevich, Candidate of technical sciences, associate professor Associate professor of «Track and track facilities» Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-59. E-mail: denia008@ukr.net.  
Korniienko Oleh Viktorovych, Senior lecturer of the department of arms and shooting of the engineering faculty National academy of the National guard of Ukraine.  
Savin Andrii Andriiovych, Senior lecturer in the department of daily management command-staff faculty National academy of the National guard of Ukraine.  
Khrystenko Yevhenii Anatoliiovych, student of the Institute of retraining and advanced training Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 26.02.2018 р.

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)**

---

УДК 691.3

**DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF COMPOSITE MATERIAL CONTAINING GLASS AND ALUMINOSILICATE MICROSPHERES FILLED WITH AIR**

Dr. sc. sciences T. O. Kostiuk, associate professor K. V. Plakhotnikov

**ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ, ЩО МІСТИТЬ СКЛЯНІ ТА АЛЮМОСИЛІКАТНІ МІКРОКУЛЬКИ, НАПОВНЕНІ ПОВІТРЯМ**

Д-р техн. наук Т. О. Костюк, канд. техн. наук К. В. Плахотніков (ХНУБА)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО СТЕКЛЯННЫЕ И АЛЮМОСИЛИКАТНЫЕ МИКРОСФЕРЫ, НАПОЛНЕННЫЕ ВОЗДУХОМ**

Д-р техн. наук Т. А. Костюк, канд. техн. наук К. В. Плахотников (ХНУСА)

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127159

---

*The article gives an analysis of the requirements for traditional heat-insulating materials. In connection with the introduction of new norms on energy saving, including in the residential sector, as well as increasing the requirements for the heat protection of buildings, the issue of the development of essentially new thermal insulation materials that meet the requirements of the time has become most urgent. One of these materials is liquid composite systems filled with glass and aluminosilicate microspheres based on polymer binders.*

**Key words:** heat-insulating materials, energy saving, thermal protection of buildings, composite systems, glass and aluminosilicate microspheres.

*У статті надано аналіз вимог, що висувуються до традиційних теплоізоляційних матеріалів. У зв'язку з впровадженням нових норм з енергозбереження, у тому числі і у житловому секторі, а також підвищенням вимог до теплозахисту будівель питання розроблення саме принципово нових теплоізоляційних матеріалів, що відповідають вимогам часу, стало найбільш актуальним. Одним з таких матеріалів є рідкі композиційні системи, наповнені скляними та алюмосилікатними мікросферами на основі полімерних зв'язуючих. Однією з причин високого інтересу до рідкої теплоізоляції є трудомісткість монтажу вентиляованих фасадів, а також проблема утеплення фасадів старих будинків, що потребують реставрації. Але склади на полімерній основі з часом потребують зміни, оскільки всі полімери «старіють», а склади на гіпсовому в'язучому не можна застосовувати зовні. Тому актуальним залишається питання в дослідженні складів, де в якості основного теплоізоляційного компонента застосовують мікросфери, що наповнені повітрям, а в якості в'язучого – цемент. Такі склади можна ефективно застосовувати як у внутрішній, так і зовнішній теплоізоляції огорожувальних конструкцій.*

**Ключові слова:** теплоізоляційні матеріали, енергозбереження, теплозахист будівель, композиційні системи, скляні та алюмосилікатні мікросфери.

*В статье дан анализ требований, предъявляемых к традиционным теплоизоляционным материалам. В связи с внедрением новых норм по энергосбережению, в том числе и в жилом секторе, а также повышением требований к теплозащите зданий вопросы разработки именно принципиально новых теплоизоляционных материалов, отвечающих требованиям времени, стало наиболее актуальным. Одним из таких материалов являются жидкие композиционные системы, наполненные стеклянными и алюмосиликатными микросферами на основе полимерных связующих. Одной из причин высокого интереса к жидкой теплоизоляции является трудоемкость монтажа вентилируемых фасадов, а также проблема утепления фасадов старых домов, нуждающихся в реставрации. Но составы на полимерной основе со временем потребуют изменения, поскольку все полимеры "стареют", а составы на гипсовом вяжущем нельзя применять снаружи. Поэтому актуальным остается вопрос в исследовании составов, где в качестве основного теплоизоляционного компонента применяют микросферы, наполненные воздухом, а в качестве вяжущего - цемент.*

**Ключевые слова:** теплоизоляционные материалы, энергосбережения, теплозащита зданий, композиционные системы, стеклянные и алюмосиликатные микросферы.

**Introduction.** Characteristic signs of modern construction are new constructive and technological solutions and new structural, finishing, waterproofing, heat-insulating materials. The introduction of new energy efficiency standards, including in the residential sector, as well as increasing the requirements for heat protection of buildings gave point to the issue of the development of fundamentally new heat-insulating materials that meet the requirements of the time.

**Analysis of recent research and publications.** The main general requirements for heat-insulating materials (HIM) and structures, depending on the field of application are: low average density, and for enclosing structures of buildings - not higher than  $500 \text{ kg/m}^3$ ; a low coefficient of thermal conductivity, which should not exceed for high-efficiency heat-insulating materials and structures  $0.09 \text{ W / m} \cdot ^\circ \text{C}$ , high temperature stability - the material and the construction of heat insulation should not burn and sustain combustion, smolder after removing the open flame and must withstand the temperature limits of their use. In addition, the material must have a constant volume, which is determined by the resistance of self-compression during shrinkage and vibration during operation, a low water absorption when immersed in water and low hygroscopicity,

frost resistance, biostability, anti-corrosion properties, harmlessness. Materials should not evolve a specific smell, substances harmful to human health and animals, as well as substances that reduce the strength of structural elements, should be harmless both during installation and operation, economic [1-5].

Modern insulation materials are mainly made of foam polymers and mineral fibers [1-4, 19, 20]. Along with undoubted merits, they also possess many of the drawbacks mentioned above. In the authors opinion, composition materials, especially inorganic ones, don't have these drawbacks[5, 21]. Appearance of glass and aluminosilicate microspheres in the market brings new ways for their improvement [6, 22, 23]. The improvement should be based on the knowledge of colloid chemistry and the physico-chemical mechanics of disperse systems and materials [7, 8], especially taking into account the electro-surface properties of the components of composites [7, 9, 10], and also on modern methods of formulation development [11, 12]. This will allow to provide the required thermal characteristics of the composites, as well as sufficient strength and high durability (especially compared to polymers) [13-16].

Materials and structures from them must allow processing with cutting tools, applying to the surface with light techniques (a sticker,

applying in the form of stucco mixes or with help of brushes), applying finishing layers on them. HIM and structures from them should be manufactured in an industrial way and meet the requirements of existing state standards and technical conditions.

All existing heat-insulating materials to a greater or lesser extent do not meet in full all indicated requirements. However, many requirements can be met by building a rational insulating structure. For example, to take precautions against moisture, increase its mechanical strength. The choice of material and design of heat insulation should take into account the positive and negative qualities, as well as the real possibilities of obtaining materials and their cost. It should be borne in mind that the high quality of the insulating fencing is determined by three conditions: a properly chosen material, a rationally designed structure and a quality performance of installation work. Therefore, the choice of insulation material regardless of design and, conversely, the choice of design without taking into account the thermal insulation material are fundamentally irrational.

Depending on the main heat-insulating material, heat insulating structures are divided according to its name. Depending on the composition of the main heat-insulating layer, the heat-insulating structures are divided into simple ones consisting of one basic heat-insulating material and composite ones consisting of several heat-insulating materials. Depending on the geometric shape and configuration of isolated objects, heat-insulating structures are divided into structures: for flat and curved surfaces.

The introduction of new energy efficiency standards, including in the residential sector, as well as increasing the requirements for heat protection of buildings, the development of fundamentally new heat-insulating materials that meet the requirements of the time has become the most urgent. One of such materials is liquid composite system filled with glass and aluminosilicate microspheres based on polymeric binders. One

of the reasons for the high interest in liquid heat insulation is due to the laborious installation of ventilated facades, as well as the problem of the insulation of the facades of old houses in need of restoration.

The most effective use of thin heat insulation of liquid type is advisable to apply for internal and external insulation of walls, roof and floor of residential and industrial buildings, as well as structures that are easily installed (garages, pavilions, kiosks, etc.); for the fire treatment of walls and ceilings on the evacuation routes of people (elevators, common corridors, staircases, etc.); for the protection of the outer walls from heating by solar radiation.

**Task set.** Since at the present time, including in the construction industry, materials consisting of the hollow microspheres (aluminosilicate and glass) as their main heat-insulating component, are gaining popularity. Such compositions can be easily applied to any curvature of the surface and consist of a single heat insulating material - microspheres filled with air. The compositions are also known based on gypsum binder, or acrylic water-soluble polymers filled with microspheres, used in construction for the purpose of heat insulation of external enclosing structures. But polymer-based compositions will eventually require replacement, since all polymers "age," and compositions on a gypsum binder can not be used externally. Therefore, the issue remains in the study of compositions where microspheres filled with air are used as the main heat insulation component, and cement is used as binding element. Such compositions can be effectively used, both in internal and external insulation of enclosing structures.

**The main material and results.** For the studies, a composite heat-insulating material was used, where the main components were white portland cement, glass and aluminosilicate microspheres filled with air from 5  $\mu\text{m}$  to 30  $\mu\text{m}$  in diameter, chemical additives to regulate hydration processes, rheological properties and strength, vapor permeability (fig. 1, 2).

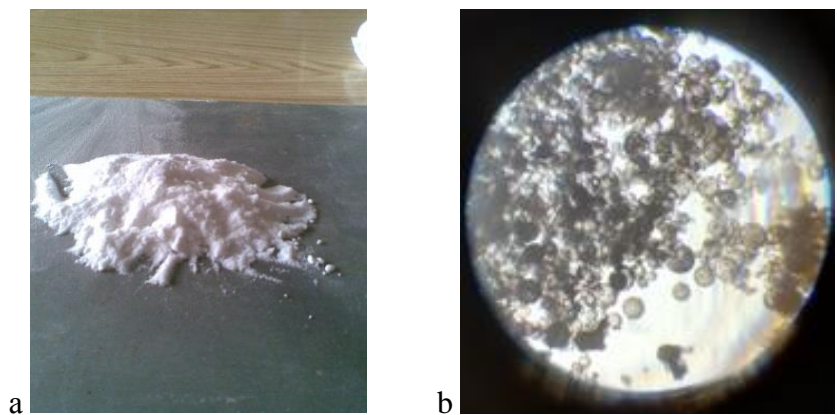


Fig. 1. Glass microspheres: a – in the loose state; b – with an increase of  $\times 10^3$

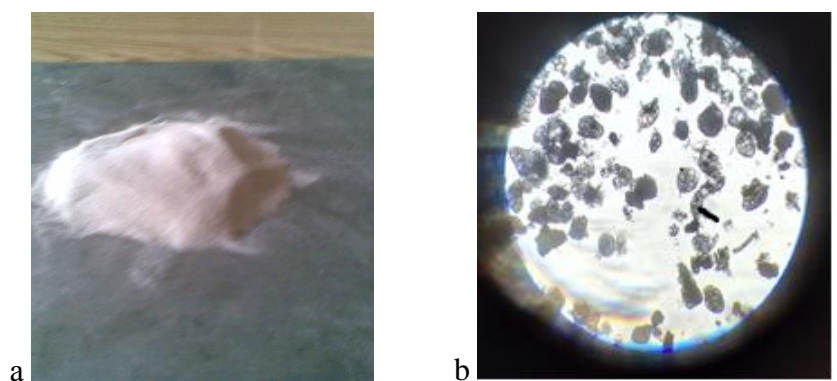


Fig. 2. Aluminosilicate microspheres: a – in the loose state; b – with an increase of  $\times 10^3$

The task was set in the work, namely, to determine the heat conductivity of the composite material, the main component of which are microspheres filled with air. To set up the experiment, a plastic container was used, on the part of the outer surface of which a composite heat-insulating material was

applied. The second part of the outer surface of the container remained uncoated (fig. 3, a). The temperature on the surface was determined using a thermal imager (fig. 3, b). The container, in which the water, was poured was heated to a certain temperature.

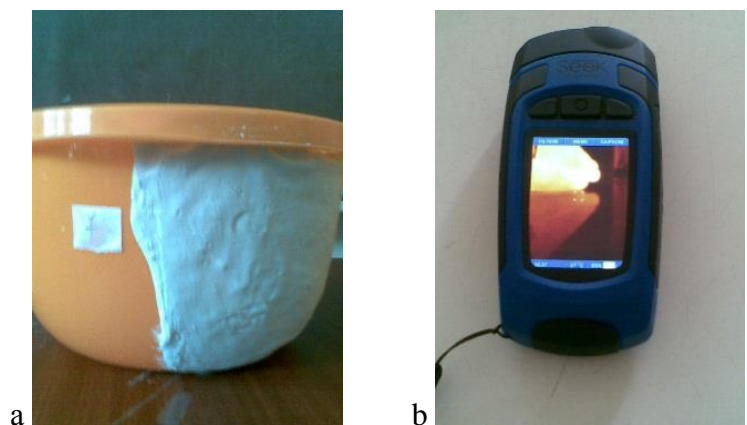


Fig. 3. A test container with a heat-insulating layer (a), thermal imager, general view (b)



Let us consider the process of heat transfer through bodies of different structures under steady-state conditions. With a constant or stationary thermal regime, the temperature of the body in time remains constant. Under given conditions, the temperature will change only in a direction perpendicular to the plane of the wall (fig. 4) [17, 18].

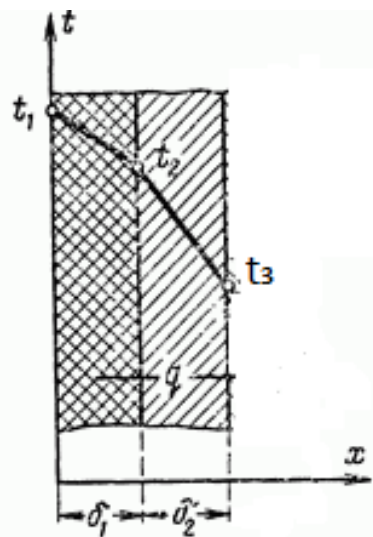


Fig. 4. Two-layered flat wall

The protective wall of the container with hot water consists of two layers that fit tightly to each other. The thickness of the first layer (plastic container) –  $\delta_1$ , the thickness of the second layer (composite coating material) –  $\delta_2$ .

Accordingly, their thermal conductivity coefficients  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ . Since the temperatures of the outer surfaces of the plastic wall of the container  $t_1$  and the coating  $t_2$  are known, and the thermal contact between the surfaces is assumed to be ideal, then the temperatures at the points of contact are indicated by  $t_1$  and  $t_2$ . Under steady-state conditions, the heat flux density is constant and for all layers is the same, therefore, one can record the heat flux density for each layer:

$$g = \frac{\lambda_1}{\delta_1}(t_1 - t_2), \quad (1)$$

$$g = \frac{\lambda_2}{\delta_2}(t_2 - t_3), \quad (2)$$

where  $\delta_1$  and  $\delta_2$  are the thickness of the plastic layer and the coating respectively,  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  are the thermal conductivity of the plastic and the coating respectively,  $t_1$  and  $t_2$  are the temperature on the plastic and coating surface, respectively.

The temperature of the water poured into the container was  $78^\circ\text{C}$ , the temperature on the surface of the plastic container was  $73^\circ\text{C}$ , the temperature on the surface of the heat-insulating layer 1 mm thick was  $51^\circ\text{C}$ , and on a layer 2 mm thick –  $28^\circ\text{C}$  (fig. 5).

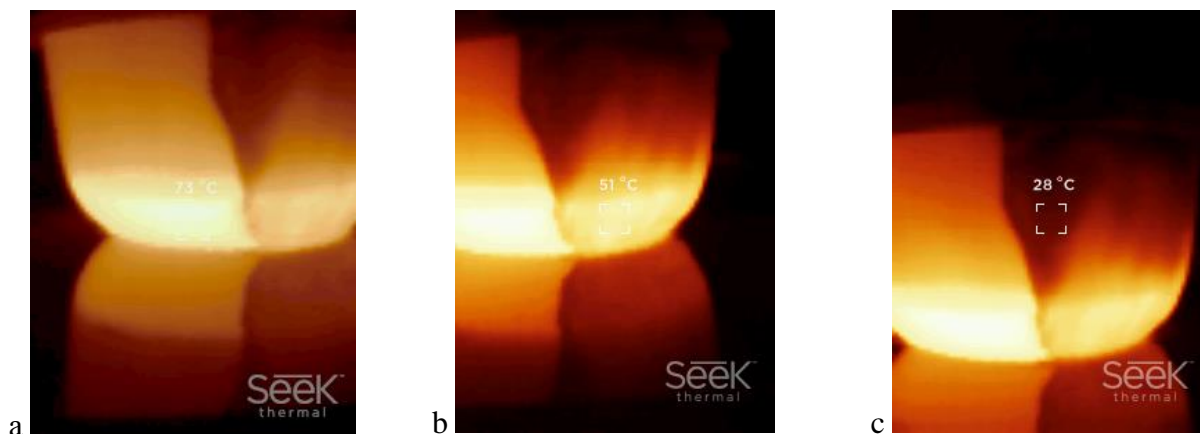


Fig. 5. Measurement of the surface temperature with the thermal imager: a – on the surface of the plastic container ( $73^\circ\text{C}$ ); b – on the surface of the coating with a thickness of 1 mm ( $51^\circ\text{C}$ ); c – on the surface of the heat-insulating coating with a thickness of 2 mm ( $28^\circ\text{C}$ )

The coefficient of thermal conductivity of the plastic, from which the container is made, is known and is equal to  $\lambda_1 = 0.15 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ , and also the wall thickness of the container is known, it is possible to calculate the density of the heat flux, which was  $750 \text{ W/m}^2$ . If a

known value of the density of the heat flux, which is the same for all layers, it is possible to calculate the thermal conductivity of the heat-insulating coating for thickness of 1 mm and thickness of 2 mm, respectively:

$$\lambda_2 = g \cdot \delta_2 / (t_2 - t_3) = 750 \cdot 0,001 / 22 = 0,0340 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$\lambda_2 = g \cdot \delta_2 / (t_2 - t_3) = 750 \cdot 0,002 / 45 = 0,0333 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C};$$

The results obtained of calculating the thermal conductivity coefficient from the surface temperature readings with the thermal imager show a slight discrepancy in the third sign, which confirms the reliability of the results obtained.

**Results.** Thus, the heat-insulating composite obtained on the basis of glass and aluminosilicate spheres, cement binder, chemical additives has a coefficient of thermal conductivity of  $0,0340\text{-}0,0333 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ , which corresponds to the coefficient of

thermal conductivity of the foam plastic  $0,037 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  up to  $0,043 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ . The thermal conductivity of the air is  $0,026 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ . That is, the resulting heat-insulating material based on aluminosilicate and glass microspheres filled with air and connected to each other in a composite heat-insulating material with a modified cement binder is promising from the point of view of thermophysical characteristics and requires further research.

## REFERENCES

1. Shoykhet, B. M. Novoye kachestvo i nomenklatura teploizolyatsionnykh materialov «San-Goben Izover» [Tekst] / B. M. Shoykhet // Stroitelnyye materialy. – 2005. – № 3. – S. 19-21.
2. Skripnik, Yu. G. Pinopolistiroл – realnist nashikh dniv [Tekst] / Yu. G. Skripnik, V. V. Petrovich, T. V. Skripnik // Budivnitstvo Ukraїni. – 2002. – № 6. – S. 37-39.
3. Burangulov, R. I. Tekhnologiya polucheniya i primeneniya osobo legkikh i legkikh polistiroлpenobetonov [Tekst] / R. I. Burangulov, G. V. Tenenbaum, D. M. Khabirov // Stroitelnyye materialy. – 2003. – № 12. – S. 16-17.
4. Teploizolyatsionnyye izdeliya URSA GLASSWOOL [Tekst] // Stroitelnyye materialy. – 2005. – № 5. – S. 38-39.
5. Krivenko, P. V. Perlitobeton na osnovi luzhnikh v'yazhuchikh – suchasniy effektivniy material [Tekst] / P. V. Krivenko, O. M. Petropavlovskiy, O. G. Gelevera, S. G. Guziy, L. V. Lavrinenko // Budivnitstvo Ukraїni. – 2002. – № 6. – S. 30-32.
6. Chayka, M. N. Teploizolyatsionnyye kraski – effektivnyy sposob ekonomii energoresursov [Elektronnyy resurs]. – <http://naukarus.com/teploizolyatsionnyye-kraski-effektivnyy-sposob-ekonomii-energoresursov>.
7. Plugin, A. N. Kolloidnaya khimiya i fiziko-khimicheskaya mekhanika tsementnykh betonov [Tekst] / A. N. Plugin, A. A. Plugin, L. V. Trikoz [i dr.] // Osnovy teorii tverdeniya. prochnosti. razrusheniya i dolgovechnosti portlandtsementa. betona i konstruktsiy iz nikh. – K. : Nauk. dumka, 2011. – T.1. – 331 s.

8. Plugin? A. A. Koloïdna khimiya ta fiziko-khimichna mekhanika yak osnova virobnitstva resursozberigayuchikh mineralnikh v'yazhuchikh rechovin ta visokoyefektivnikh kompozitsiynikh materialiv na ikh osnovi [Tekst] / A. A. Plugin, A. M. Plugin, O. S. Kaganovskiy, O. V. Gradoboev // Zb. nauk. prats UkrDAZT. – Kharkiv, 2013. – Vip. 138. – S. 7-19. DOI: 10.18664/1994-7852.138.2013.102065
9. Plugin, A. N. Teoriya tverdeniya portlandtsementa [Tekst] / A. N. Plugin, A. A. Plugin, O. A. Kalinin [i dr.] // Osnovy teorii tverdeniya. prochnosti. razrusheniya i dolgovechnosti portlandtsementa. betona i konstruktsiy iz nikh. – K. : Nauk. dumka, 2012. – T. 2. – 224 s.
10. Babushkin, V. I. Vliyaniye aktivnykh poverkhnostnykh tsemtrov na prochnost svezheotformovannykh melkozernistykh betonov [Tekst] / V. I. Babushkin, A. A. Plugin, T. A. Kostyuk, V. A. Matviyenko // Naukoviy visnik budivnitstva. – Kharkiv : KhDTUBA. KhOTV ABU. 1999. – Vip. 5. – S. 85-88.
11. Lyashenko, T. V. Metodologiya retsepturno-tekhnologicheskikh poley v kompyuternom stroitelnom materialovedenii [Tekst] / T. V. Lyashenko, V. A. Voznesenskiy. – Odesa : Astroprint. 2017. – 168 s.
12. Plugin, A. A. Programmnoye obespecheniye sistemy proyektirovaniya sostava betona dlya konstruktsiy i sooruzheniy zheleznykh dorog [Tekst] / A. A. Plugin, O. A. Kalinin, N. D. Sizova, I. A. Mikheyev // Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva. – 2013. – №6/1(14). – S. 38-40.
13. Plugin, A. N. Kolloidno-khimicheskiye osnovy prochnosti razrusheniya i dolgovechnosti betona i zhelezobetonnykh konstruktsiy [Tekst] / A. N. Plugin, A. A. Plugin, O. A. Kalinin // Tsement. – 1997. – №2. – S. 28-32.
14. Plugin, A. A. Fiziko-khimicheskaya model dolgovechnosti betona i zhelezobetona [Tekst] / Problemi nadiynosti ta dovgovichnosti inzhenernikh sporud ta budivel na zaliznichnomu transporti : Zb. nauk. prats UkrDAZT. – Kharkiv, 2006. – Vip. 77. – S. 104-119.
15. Plugin, A. N. Kolloidno-khimicheskiye osnovy prochnosti i dolgovechnosti betona i konstruktsiy [Tekst] / A. A. Plugin // Stroitelnyye materialy. – 2007. – №7 (631). – S. 68-71.
16. Plugin, A. N. Teoriya prochnosti. razrusheniya i dolgovechnosti betona. zhelezobetona i konstruktsiy iz nikh [Tekst] / A. N. Plugin, A. A. Plugin, O. A. Kalinin [i dr.] // Osnovy teorii tverdeniya. prochnosti. razrusheniya i dolgovechnosti portlandtsementa. betona i konstruktsiy iz nikh. – K. : Nauk. dumka, 2012. – T. 3. – 288 s.
17. Bogoslovskiy, V. N. Stroitel'naya teplofizika [Tekst] / V. N. Bogoslovskiy. – M. : Visshaya shkola, 1982. – 198 s.
18. Fokin, K. F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniya [Tekst] / K. F. Fokin. – M. : AVOK-PRESS, 2006. – 256 s.
19. Thermal Insulation Materials. Material Characterization, Phase Changes, Thermal Conductivity [Text] // NETZSCH-Gerätebau GmbH. – Germany. Selb. – 2016. – 23 p.
20. Yurkov, A. L. Properties of Heat-Insulating Materials (A Review) [Text] / A. L. Yurkov, L. M. Aksel'rod // Refractories and Industrial Ceramics. – 2008. – Vol. 46. – Issue 3. – P. 170–174.
21. Ryzhenkov, A.V., Pogorelov, S.I., Loginova, N.A., Belyaeva, E.V., Plestsheva, A.Yu. [Text] / S.I.Pogorelov, N.A.Loginova, E.V.Belyaeva, A.Yu. Plestsheva. // Syntactic Foams Efficiency with the Use of Various Microspheres for Heat Supply Equipment and Pipelines Heat Insulation. Modern Applied Science. – 2015. – Vol. 9. – №. 4. – PP. 319-327.
22. Aruniit, A. Influence of hollow glass microspheres on the mechanical and physical properties and cost of particle reinforced polymer composites [Text] / A. Aruniit, J. Kers, J. Majak, A. Krumme, K. Tall // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. – 2012. – Vol. 61. – №. 3. – P. 160–165.

23. Liang, J. Z. Effects of the glass bead content and the surface treatment on the mechanical properties of polypropylene composites [Text] / J. Z. Liang, C. B. Wu // Journal of Applied Polymer Science. – 2012, – Vol. 123. – №. 5. – P. 3054-3063.

---

Kostiuk T. O., Dr. of Tech. in Economics, Professor, Professor, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture. Tel. +38 (050) 652 82 19. E-mail: takostuk@ukr.net.

Plahotnikov K. V., associate professor, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture. E-mail: kirillplahotnikov84@gmail.com. Tel. +38 (093) 646 59-39.

Костюк Тетяна Олександрівна, доктор технічних наук, професор Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел. +38 (050) 652 82 19. E-mail: takostuk@ukr.net.

Плаhotніков Кирило Валерійович, кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел. +38 (093) 646 59-39. E-mail: kirillplahotnikov84@gmail.com.

Костюк Татьяна Александровна, доктор технических наук, профессор Харьковского национального университета строительства и архитектуры. Тел. +38 (050) 652 82 19. E-mail: takostuk@ukr.net.

Плаhotников Кирилл Валерьевич, кандидат технических наук, доцент Харьковского национального университета строительства и архитектуры. Тел. +38 (093) 646 59 39. E-mail: kirillplahotnikov84@gmail.com.

Статтю прийнято 22.02.2018 р.

УДК 624.011.2:668.3

### **ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ З ОПТИМІЗАЦІЇ МАТЕРІАЛО- І ТРУДОВИТРАТ ПРИ АНКЕРОУСТАНОВЛЮВАЛЬНИХ РОБОТАХ З ВИКОРИСТАННЯМ АКРИЛОВИХ КОМПОЗИЦІЙ**

Кандидати техн. наук Н. М. Золотова, В. О. Склярів, асист. О. Ю. Супрун (ХНУМГ)

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ МАТЕРИАЛО- И ТРУДОЗАТРАТ ПРИ АНКЕРОУСТАНОВОЧНЫХ РАБОТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКРИЛОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

Кандидаты техн. наук Н. М. Золотова, В. А. Склярів, ассист. О. Ю. Супрун (ХНУГХ)

### **TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR OPTIMIZATION OF MATERIAL AND LABOR COSTS AT THE ANKEROUS INSTALLATION WORKS WITH THE USE OF ACRYLIC COMPOSITIONS**

PhD in Technical Science, assistant professor N. M. Zolotova, PhD in Technical Science, assistant professor V. O. Sklyarov, assistant O. Y. Suprun

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127162

---

*Наведено результати дослідження впливу організаційно-технологічних факторів на тривалість встановлення в бетоні хімічних анкерів з використанням акрилових композицій і умов виконання робіт, зокрема вибір найбільш оптимального обладнання.*

*Ключові слова:* анкер, клейовий склад, акрилова композиція, організаційно-технологічне рішення, технологічні параметри.

*Приведены результаты исследования влияния организационно-технологических факторов на продолжительность установки в бетоне химических анкеров с использованием акриловых композиций и условий выполнения работ, в частности выбор наиболее оптимального оборудования.*

**Ключевые слова:** анкер, клеевой состав, акриловая композиция, организационно-технологическое решение, технологические параметры.

*The results of the study of the influence of organizational and technological factors on the duration of installation in concrete of chemical anchors using acrylic compositions and the conditions for the execution of works are given. In particular, the choice of the most optimal equipment. In this study, two schemes for the development of a specialized flow of anchor installation work were considered - the successive implementation of the processes of preparing the adhesive mixture, the filling of apertures and the installation of a bolt with one link (worker) and the parallel execution of these processes by several links. The dependence of the cost of acrylic composition and the duration of the installation on the diameter of the anchor is established. The connection of the optimum volume of glutinous mixture from its technological viability and anchor parameters is revealed.*

**Key words:** anchor, adhesive composition, acrylic composition, organizational and technological solution, technological parameters.

**Вступ.** У сучасних умовах одним з найважливіших напрямків науково-технічного прогресу в будівництві в Україні є використання ефективних методів з'єднання будівельних конструкцій як при новому будівництві, так і при ремонті й реконструкції існуючих будівель і споруд різного призначення. Ступінь зносу будівель і споруд, що експлуатуються, є високою, і необхідність капітального ремонту, реконструкції і модернізації вимагає раціонального та ощадливого використання матеріалів, скорочення термінів виконання робіт за рахунок застосування нових матеріалів і прогресивних методів виробництва будівельно-монтажних робіт.

Актуальність теми досліджень визначається, з одного боку, об'єктивною потребою підвищення якості улаштування клейових акрилових анкерів, а з іншого – зниженням показників вартості та тривалості анкероустановлювальних робіт.

Вищевикладене дає можливість стверджувати, що необхідне розроблення науково обґрунтованих технічних і організаційно-технологічних рішень з установлення в промислових і цивільних

будівлях анкерів у бетоні з використанням акрилових композицій з високим ступенем надійності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Слід зазначити, що актуальні наукові проблеми в даному сегменті досліджень вирішувалися роз'єднано, у двох споріднених напрямках – матеріалознавстві і технології виконання робіт. Такий підхід не давав можливості вирішити існуючі проблеми комплексно, що негативно позначалося на ефективності процесів улаштування клейових анкерів.

Питанням удосконалення технічних і організаційно-технологічних рішень при зведенні, ремонті та реконструкції об'єктів різного призначення велику увагу приділено в роботах таких учених, як Д. Ф. Гончаренко [2], М. С. Золотов [4, 5], Н. М. Золотова [3, 6, 13], В. О. Склярів [9], М. Ю. Избаш [7], О. І. Менейлюка [8], О. Ю. Супрун [10], Л. М. Шутенко [11, 12]. Питання удосконалення конструктивних і технологічних рішень при улаштуванні анкерних кріплень досліджували також іноземні автори: J. Barnat [14], Ph. Grosser [15], P. Rizzo, A. Spada, S. Degala, G. Giambanco [16], M. Xin Fan, Lin Niu [17].

Незважаючи на прийняті в останні роки заходи, спрямовані на забезпечення надійної експлуатації будівель і споруд, включаючи конструкції клейових анкерних з'єднань, багато завдань підвищення їхньої експлуатаційної надійності чекають на своє вирішення.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Обґрунтувати та визначити основні організаційно-технологічні рішення установа анкерів і умов виконання робіт. Зв'язок між умовами виконання анкероустановлювальних робіт і параметрами організаційно-технологічних рішень виявлений методом математичного моделювання. Для визначення ступеня обґрунтованості прийнятих наукових положень, висновків і рекомендацій шляхом практичного використання в будівельних, проектних, інвестиційних організаціях прийнято метод експериментальних досліджень.

**Основна частина дослідження.** Проведені дослідження [1-5] виявили технологічні особливості кріплення обладнання на полімерних композиціях у готові фундаменти, бетонні підлоги, залізобетонні плити перекриттів.

У даному дослідженні розглядалися дві схеми розвитку спеціалізованого потоку анкероустановлювальних робіт – послідовне виконання процесів готування клейової суміші, заповнення отворів й установа болта однією ланкою (працівником) і паралельне виконання зазначених процесів декількома ланками [3-5]. Операції з улаштування отворів під анкери виконуються з випередженням робіт з установа болтів.

Технологічні параметри процесу анкероустановлювальних робіт, що впливають на показники його трудомісткості й тривалості, – це тривалість готування об'єму клейової суміші на захватку й питома тривалість установа клейового анкера.

Тривалість готування клейової суміші на захватку ( $t_{захв}$ ) можна визначити за формулою

$$t_{захв} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \quad (1)$$

де  $t_1$  – тривалість змішування складових акрилової суміші, хв;

$t_2$  – тривалість набухання створеної суміші, хв;

$t_3$  – тривалість введення в суміш піщаного наповнювача, хв;

$t_4$  – тривалість доставки до місця улаштування анкера, хв.

З аналізу даної залежності й технологічних особливостей установа анкерних болтів випливає, що  $t_1$ ,  $t_3$  і  $t_4$  є величинами постійними для будь-якого складу акрилової клейової суміші і визначаються на основі хронометражних спостережень. Час набухання акрилової композиції залежить від температури навколишнього середовища, тому тривалість анкероустановлювальних робіт відповідно збільшується.

Тривалість установа одного анкера

$$t_y = t_k + \frac{t_0 + t_n}{n_c}, \quad (2)$$

де  $t_0$  – тривалість підготовчих операцій, хв;

$t_k$  – тривалість заповнення отвору акриловою сумішшю, хв;

$t_n$  – тривалість установа в отвір і вивірення анкерного болта, хв;

$n_c$  – коефіцієнт суміщення робіт.

Показники  $t_0$  й  $t_n$  змінюються залежно від діаметра болта. Тривалість  $t_k$  залежить від діаметра та глибини отвору. Значення  $t_k$ ,  $t_0$  й  $t_n$  визначалися при хронометражних спостереженнях. Проведені дослідження [3-5] показали, що для болтів діаметром 16÷36 мм пробурені отвори повинні перевищувати діаметр болта на 4÷6 мм, для болтів діаметром 42÷56 мм різниця може бути 8÷10 мм. Зайве збільшення діаметра отвору призводить до збільшення тривалості заповнення отвору, що

сповільнює технологічний процес, і веде до перевитрат клеючого складу.

Правильно обраний діаметр бура дозволяє скоротити тривалість робіт і заощадити витрату клеючого складу  $q$ . Так, для болта діаметром 24 мм варто використовувати один з наявних у комплекті перфоратора бурів діаметром 25÷30 мм з одержанням отворів діаметрами відповідно 27÷32 мм.

Збільшення діаметра отвору на 6 мм веде до збільшення питомих витрат акрилової суміші на 85 г. Якщо врахувати змінну інтенсивність установа болтів, то перевитрати акрилової суміші за зміну може скласти декілька кілограмів. Це також веде до збільшення тривалості заповнення отворів, що відповідно збільшує загальну тривалість робіт. Для цих вихідних даних за зміну втрата часу складе 82 хв.

Раціональність параметрів анкероустановлювальних робіт залежить також від раціонального використання клейової суміші [6, 9, 12-17].

Невідповідність об'єму суміші  $P$  його технологічній життєздатності  $T$  й інтенсивності робіт  $N_t$  визначає або втрату суміші  $P > P_{рац}$ , або необхідність повторних циклів її приготування  $P < P_{рац}$ . Тому необхідно визначити раціональний об'єм клейової суміші на захватку  $P_{рац}$ .

Питомий об'єм суміші для установа одного болта  $p$  при глибині закладення 10 діаметрів становить

$$p = 7,85d \left( d_c^2 - d^2 \right) \gamma, \quad (3)$$

де  $d_c$  – діаметр отвору, мм;

$d$  – діаметр болта, мм;

$\gamma$  – об'ємна вага суміші, кг/м<sup>3</sup>.

Кількість болтів, що встановлюються у зміну

$$n = \frac{P_{зм}}{p}. \quad (4)$$

Вага суміші, що готується за зміну,

$$P_{зм} = P_{рац} \frac{T_{зм}}{t_{пр}} p, \quad (5)$$

де  $T_{зм}$  – тривалість зміни, год;

$t_{пр}$  – тривалість приготування однієї порції, хв.

$$P_{рац} = \frac{T}{t_y} p. \quad (6)$$

Об'єм раціональної порції  $P_{рац}$  залежить від діаметра анкера і життєздатності клейової суміші  $T$ .

У результаті аналізу технологічних особливостей процесу при послідовному розвитку спеціалізованого потоку для болтів діаметром 16÷36 мм раціонально готувати клейову суміш вручну порцією по 6÷7 кг, для діаметра болтів 36÷56 мм відповідно порцією 11÷21 кг, при цьому використовувати змішувач типу «Стромікс» або аналогічний (рисунок). При паралельному розвитку потоку суміш слід готувати тільки в розчиномішалці. Порція суміші при цьому може дорівнювати 150 кг.

При більших обсягах анкероустановлювальних робіт для приготування клейової суміші необхідно використовувати змішувач типу СО-46Б, СРК-90, РКС-90 (рисунок). Оптимальна життєздатність клею, при якій найповніше використовується потужність змішувача,

$$P = \frac{T \cdot T_{зм}}{t_y - t_{пр}}. \quad (7)$$

Звідси

$$T = \frac{P_{зм} \cdot t_y \cdot t_{пр}}{p \cdot T_{зм}}. \quad (8)$$



Рис. Малогабаритне обладнання для змішування клейової суміші:  
а – «Стромікс»; б – СРК-90; в – РКС-90

Необхідні об'єми залежно від технологічної життєздатності акрилової суміші визначимо за формулою

$$P_{порц} = V \cdot \gamma, \quad (9)$$

де  $P_{порц}$  – вага однієї порції, кг;  
 $V$  – робоча місткість змішувача, л;  
 $\gamma$  – об'ємна вага суміші, кг/м<sup>3</sup>,  
або за залежністю

$$P_{порц} = \frac{T}{t_y} \cdot p. \quad (10)$$

Прирівнявши праві й ліві частини формул (9), (10) і розділивши на  $\gamma$ , отримаємо

$$V = \frac{Tp}{\gamma \cdot t_y}. \quad (11)$$

**Висновки.** Виконано формування структури технологічного процесу анкероустановлювальних робіт і визначено основні його технологічні параметри. Аналітично встановлена залежність тривалості готування акрилової композиції від температури навколишнього середовища. Встановлено вплив температури готування акрилової клейової суміші і тривалості процесу, що забезпечує максимальну інтенсивність виконання анкероустановлювальних робіт.

Встановлено залежність витрат акрилового складу й тривалості установа від діаметра анкера. Виявлено зв'язок оптимального об'єму клейової суміші від її технологічної життєздатності й параметрів анкера.

### Список використаних джерел

1. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності [Текст] : ДСТУ Б В.2.7-170:2008. – [Чинний з 2009-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 38 с. – (Національний стандарт України).
2. Гончаренко, Д. Ф. Методы формирования инженерной подготовки реконструкции промышленных предприятий [Текст] : дисс... д-ра техн. наук : спец. 05.23.08 «Технология и организация промышленного и гражданского строительства» / Д. Ф. Гончаренко. – М. : МИСИ, 1991. – 495 с.



3. Золотова, Н. М. Акриловая композиция для анкероустановочных работ [Текст] / Н. М. Золотова, О. Ю. Супрун // Будівельний журнал. – 2016. – № 5-6 (123-124). – С. 84.
4. Золотов, М. С. Влияние различных факторов на вязкость акрилового компаунда [Текст] / М. С. Золотов, О. Ю. Супрун, А. Х. Дауд // Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства : матеріали IV Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф., 25 лист. – 25 груд. 2014 р. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – С. 93-96.
5. Золотов, М. С. Механизация анкероустановочных работ в строительстве [Текст] / М. С. Золотов, О. Ю. Супрун, А. Х. Дауд // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне : Нац. ун-т водного госп. та природокористування, 2014. – Вип. 29. – С. 654-661.
6. Золотова, Н. М. Влияние вязкости акрилового компаунда на эффективность заделки анкерных болтов на акриловых клеях в бетон [Текст] / Н. М. Золотова, О. Ю. Супрун // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА: ХОТВ АБУ, 2015. – Вип. 4(82). – С. 86-89.
7. Избаш, М. Ю. Подбор рационального состава фибробетонной смеси [Текст] / М. Ю. Избаш, Ф. И. Казимагомедов // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА: ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 72. – С. 220–224.
8. Менейлюк, А. И. Современные технологии в строительстве [Текст] / А. И. Менейлюк, В. С. Дорофеев, Л. Е. Лукашенко [и др.]. – 3-е изд., доп. и перераб. – К. : Освіта України, 2011. – 534 с.
9. Склярів, В. О. Применение клеевых анкеров при прокладке трассы воздушной линии электропередач и монтаже опор на готовых фундаментах [Текст] / В. О. Склярів, Н. М. Золотова // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2016. – Вип. 33. – С. 269-276.
10. Супрун, О. Ю. Прогнозування параметрів процесу встановлення в бетоні анкерів на акрилових композиціях [Текст] / О. Ю. Супрун // International scientific journal. – 2016. – № 10. – С. 20-28.
11. Анкерні болти : конструкція, розрахунок, проектування, технологія влаштування [Текст] : навч. посібник / Л. М. Шутенко, М. С. Золотов, В. О. Склярів, Н. М. Золотова. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 204 с.
12. Акрилова композиція для кріплення анкерних болтів [Текст] : пат. №88250 Україна / Шутенко Л. М., Волювач С. В., Золотов С. М., Волювач В. С., Золотова Н. М. – опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.
13. Zolotova, N. Technological parameters definition influencing of anchor screw-bolts application on acrylic adhesives [Text] / N. Zolotova, O. Suprun // Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky. - Košice, Slovakia : ASMB, 2015. – Vol. 3. – № 4. – P. 148-150.
14. Barnat, J. The Shear Strength of Epoxy Adhesive Used for Chemical Anchors [Text] / J. Barnat, M. Bajer // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1122. – P. 278-281.
15. Grosser, Ph. A Field Study of Adhesive Anchor Installations : Theory and practice [Text] / Ph. Grosser, W. Fuchs, R. Eligehausen // Concrete international. – 2011. – Vol. 1. – P. 57-63.
16. Rizzo, P. Acoustic Emission Monitoring of Chemically Bonded Anchors [Text] / P. Rizzo, A. Spada, S. Degala, G. Giambanco // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2010. – Vol. 29. – Issue 1. – P. 49–61.
17. Xin, Fan. Performance of redispersible polymer powders in wall coatings [Text] / Xin Fan, Lin Niu // Journal of Adhesion Science and Technology. – Dec/2014. – 29 (4). – P. 296-307

---

Золотова Ніна Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології будівельного виробництва і будівельних матеріалів Харківського національного університету міського господарства імені А. М. Бекетова.  
E-mail: nina.zolotova53@gmail.com.

Склярів Вячеслав Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені А. М. Бекетова.  
E-mail: skliarovviacheslav@gmail.com.

---

Супрун Олег Юрьевич, асистент кафедри технології будівельного виробництва і будівельних матеріалів Харківського національного університету міського господарства імені А. М. Бекетова. E-mail: director@ups.org.ua.

Золотова Ніна Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології строительного производства и строительных материалов Харьковского национального университета городского хозяйства имени А. Н. Бекетова. E-mail: nina.zolotova53@gmail.com.

Склярів Вячеслав Александрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретической и строительной механики Харьковского национального университета городского хозяйства имени А. Н. Бекетова. E-mail: skliarovviacheslav@gmail.com.

Супрун Олег Юрьевич, асистент кафедри технології строительного производства и строительных материалов Харьковского национального университета городского хозяйства имени А. Н. Бекетова. E-mail: director@ups.org.ua.

Zolotova N., PhD in Technical Science, assistant professor Department of Building materials and construction technologies of the A. M. Becetova. E-mail: nina.zolotova53@gmail.com.

Sklyarov V.O., PhD in Technical Science, assistant professor Department of theoretical and structural mechanics of the A. M. Becetova. E-mail: skliarovviacheslav@gmail.com.

Suprun O., assistant Department of Building materials and construction technologies of the A. M. Becetova. E-mail: director@ups.org.ua.

Статтю прийнято 26.02.2018 р.

УДК 624.072.2.012.35:539.374

## РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПІДКРАНОВИХ БАЛОК ПРИ КОСОМУ ЗГИНІ

Канд. техн. наук. О. В. Гарькава, маг. Б. А. Баріляк (ПолтНТУ)

## РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

Канд. техн. наук. О. В. Гарькавая, маг. Б. А. Барыляк (ПолтНТУ)

## BEARING CAPACITY CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE CRANE BEAMS UNDER BIAXIAL BENDING

Cand. of techn. sciences O. V. Harkava, mast. B. A. Barilyak (PoltNTU)

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127166

*Розроблено методику розрахунку несучої здатності в нормальному перерізі косозігнутих залізобетонних підкранових балок таврового профілю на основі спрощеної деформаційної моделі з прямокутним розподілом напружень у стиснутій зоні бетону. Методика пропонується для розрахунку балок з трапецієподібною формою стиснутої зони бетону, враховує всі положення чинних нормативних документів і, на відміну від існуючих, дозволяє виконувати обчислення без застосування чисельних методів.*

**Ключові слова:** залізобетон, балка, косий згин, несуча здатність, розрахунок.

*Разработана методика расчета несущей способности в нормальном сечении косоизогнутых железобетонных подкрановых балок таврового профиля на основе упрощенной деформационной модели с прямоугольным распределением напряжений в сжатой зоне*

бетона. Методика пропонується для розрахунку балок з трапецевидною формою сжатої зони бетону, уключає всі положення діючих нормативних документів і, в отличие от существующих, позволяет выполнять вычисления без применения численных методов.

**Ключевые слова:** железобетон, балка, косою изгиб, несущая способность, расчет.

*The method of calculating the bearing capacity in the normal section of biaxial bended reinforced concrete T-section crane beams is developed. The problem of difficulty applying the deformation model in the study of biaxial deformed elements is successfully solved by the introduction of the rectangular stress distribution in a concrete compressed area and deformative criterion of strength. Analytical formulas are derived for the determination of all unknown parameters when calculating for biaxial bending: the neutral axis depth, the angle of inclination of the neutral axis, and the internal bending moment. The method is proposed for calculating beams with a trapezoidal shape of the concrete compressed area, taking into account all provisions of the effective normative documents and, unlike the existing ones, allows performing calculations without the use of numerical methods. The developed method of calculating provides the necessary accuracy of the calculations and can be implemented in the form of an engineering algorithm.*

**Key words:** reinforced concrete, beam, biaxial bending, bearing capacity, calculation.

**Вступ.** Залізобетонні підкранові балки широко застосовуються у виробничих будівлях багатьох промислових підприємств, у тому числі на залізниці: у вагонних депо, тепловозоремонтних заводах, збиральних цехах. Таке широке використання цих конструкцій у різних галузях господарства вимагає ретельного підходу до їх проектування. Крім того, з огляду на вичерпані приблизні терміни експлуатації виробничих будівель і споруд, збудованих за часів Радянського Союзу, виникла необхідність розроблення підсилення або заміни їхніх несучих конструкцій, у тому числі й підкранових балок. При цьому відомі серійні рішення підкранових залізобетонних балок вже не відповідають вимогам чинних нормативних документів [1–3], а тому потребують удосконалення. Отже, проектування залізобетонних підкранових балок на сьогодні є актуальним завданням.

Від дії кранових навантажень у вертикальній і горизонтальній площинах підкранові балки зазнають косою згину. Однак через недостатню вивченість і велику трудомісткість розрахунку на дійсний напружений стан його тривалий час спрощували шляхом виконання

обчислень на плоский згин окремо у двох взаємно перпендикулярних площинах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробленню методів розрахунку несучої здатності залізобетонних елементів, що зазнають косою згину, на основі нелінійної деформаційної моделі присвячено роботи [4–8] та ін. Зокрема у працях [7–8] розв'язуються задачі розрахунку косозігнутих елементів таврового профілю на основі використання дволінійних діаграм деформування бетону й арматури, але викладені пропозиції не приведені до рівня інженерного застосування. У роботах зарубіжних вчених [9–12] проблеми розрахунку несучої здатності косозігнутих і косостиснутих елементів вирішуються у загальному вигляді для перерізів довільної конфігурації з отворами та без них, але такий підхід є складним для практичної реалізації, а запропоновані спрощення у вигляді графіків і діаграм є дуже наближеними. Таким чином, існує об'єктивна необхідність у розробленні методики розрахунку підкранових залізобетонних балок таврового профілю на косою згин, що забезпечить необхідну точність обчислень і може бути реалізована у вигляді інженерного алгоритму.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою є розроблення на основі спрощеної деформаційної моделі методики розрахунку несучої здатності косозігнутих залізобетонних підкранових балок у нормальному перерізі, що враховує повною мірою всі положення чинних нормативних документів та є достатньо зручним у практичному застосуванні.

**Основна частина дослідження.** Розв'язується задача отримання аналітичних формул для визначення всіх невідомих параметрів при розрахунку несучої здатності в нормальному перерізі косозігнутої залізобетонної підкранової балки таврового профілю з трапецієподібною формою стиснутої зони бетону. В основу теоретичних досліджень покладено передумови розрахунку за

нормами [1]. При цьому для описання роботи стиснутого бетону прийнято прямокутний характер розподілу напружень за рис. 3.5 [1]. Зв'язок між напруженнями і деформаціями в попередньо напруженій арматурі описується дволінійною діаграмою з горизонтальною верхньою гілкою без необхідності перевірки граничної деформації за рис. 3.10 [1].

Для розв'язання поставленої задачі використана розрахункова схема (рис. 1), вихідними величинами є розміри нормального перерізу балки  $b$ ,  $b_{eff}$ ,  $h$  та  $h_{eff}$ , площа поперечного перерізу попередньо напруженої арматури  $A_p$  в розтягнутій зоні; характеристики арматури  $f_{pd}$ ,  $E_p$  та бетону  $f_{cd}$ ,  $E_{cd}$ ,  $\epsilon_{c3,cd}$ ,  $\epsilon_{cu3,cd}$ .

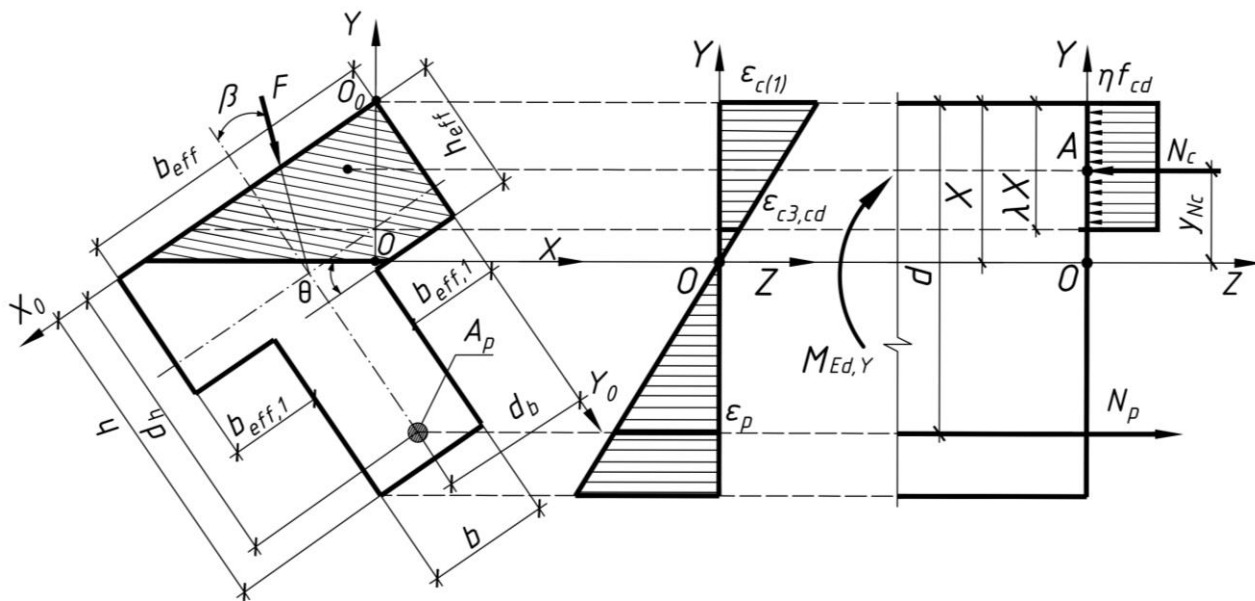


Рис. 1. Розрахункова схема нормального перерізу для розрахунку несучої здатності косозігнутої залізобетонної балки при трапецієподібній формі стиснутої зони бетону

При розрахунку сумарна площа попередньо напруженої арматури  $A_p$  в розтягнутій зоні розглядається розташованою в точці прикладання рівнодійної зусиль у дискретно розташованих розтягнутих стрижнях.

Невідомими величинами вважаються висота  $X$  стиснутої зони, кут  $\theta$  нахилу нейтральної лінії, значення внутрішнього згинального моменту  $M_{Rd,Y}$  в площині координатної осі  $Y$  (рис. 1).

Для виведення розрахункових формул використані загальні рівняння рівноваги. Ураховуючи викладені вище передумови,

розрахункові рівняння рівноваги в площині координатної осі  $Y$  перпендикулярної до нейтральної лінії, записані у вигляді

$$\sum Z = 0: N_p - N_c = 0; \quad (1)$$

$$\sum M_A = 0: N_p (d - X + y_{N_c}) - M_{Ed,Y} = 0, \quad (2)$$

де  $N_p, N_c$  – рівнодійні зусиль відповідно в розтягнутій попередньо напруженій арматурі та стиснутому бетону;

$d, X, y_{N_c}$  – відповідно робоча висота перерізу, висота стиснутої зони бетону та координата точки прикладання зусилля  $N_c$  в координатній площині  $XOY$ .

Для спрощення рівнянь рівноваги спочатку отримані вирази для визначення рівнодійної  $N_c$  та її координати  $y_{N_c}$ . Одержані вирази при трапецієподібній формі стиснутої зони бетону (рис. 1) мають такий вигляд:

$$N_c = \frac{\eta f_{cd} h_{eff}}{2 \sin \theta} (2\lambda X - h_{eff} \cos \theta); \quad (3)$$

$$y_{N_c} = \frac{3X^2(2\lambda - \lambda^2) - h_{eff} \cos \theta(3X - h_{eff} \cos \theta)}{3(2\lambda X - h_{eff} \cos \theta)}, \quad (4)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт, що приймається за залежностями (3.21) – (3.22) [1];

$\lambda$  – рівень пластичності бетону, що приймається за залежностями (3.19), (3.20) [1];

$\theta$  – кут нахилу нейтральної лінії.

За умови, що деформації  $\varepsilon_p$  попередньо напруженої арматури в момент руйнування задовольняють нерівність

$$\frac{f_{pd}}{E_p} \leq \varepsilon_p = \frac{(d - X) \varepsilon_{c(1)}}{X}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_{c(1)}$  – відносні деформації бетону найбільш стиснутого ребра балки, рівнодійна зусиль в арматурі визначається за залежністю

$$N_p = f_{pd} A_p. \quad (6)$$

На основі прийнятого деформаційного критерію руйнування відносні деформації бетону найбільш стиснутого ребра балки (рис. 1) приймаються за рівністю

$$\varepsilon_{c(1)} = \varepsilon_{cu3,cd}. \quad (7)$$

Після підстановки формул (3), (4) та (6) у рівняння рівноваги (1), (2) при трапецієподібній формі стиснутої зони отримані формули для визначення висоти  $X$  стиснутої зони бетону та граничного значення моменту  $M_{Rd,Y}$  в площині координатної осі  $Y$  (рис. 1):

$$X = \frac{h_{eff} \cos \theta}{2\lambda} + \frac{f_{pd} A_p \sin \theta}{\eta f_{cd} \lambda h_{eff}}; \quad (8)$$

$$M_{Rd,Y} = f_{pd} A_p \left( d - \frac{3X^2 \lambda^2 - h_{eff}^2 \cos^2 \theta}{3(2\lambda X - h_{eff} \cos \theta)} \right), \quad (9)$$

де

$$d = d_b \sin \theta + d_h \cos \theta. \quad (10)$$

Для одержання залежності  $\theta = f(\beta)$ , за допомогою якої можна обчислити кут  $\theta$  нахилу нейтральної лінії, застосована

умова про паралельність площин дії внутрішнього  $M_{Rd}$  та зовнішнього  $M_{Ed}$  моментів (рис. 2).

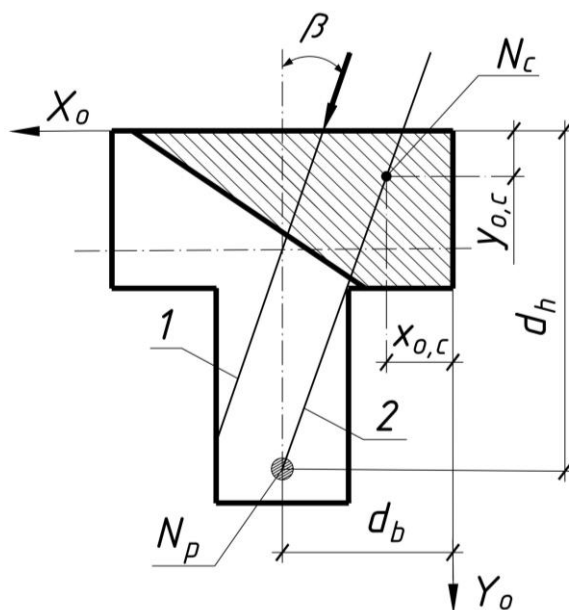


Рис. 2. Розташування зовнішньої (1) і внутрішньої (2) силових площин у тавровому перерізі косозігнутої балки

У системі координат  $X_0 O_0 Y_0$  отримано, що

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{d_b - x_{0,c}}{d_h - y_{0,c}}, \quad (11)$$

де  $\beta$  – кут нахилу зовнішньої силової площини;

$d_b, d_h$  – робочі висоти поперечного перерізу косозігнутої залізобетонної балки в напрямку осей  $X_0$  і  $Y_0$  відповідно;

$x_{0,c}, y_{0,c}$  – координати точки прикладання рівнодійної  $N_c$  в бетоні стиснутої зони в системі координат  $X_0 O_0 Y_0$ ,

$$x_{0,c} = \frac{3\lambda X(\lambda X - 3h_{eff} \cos \theta) + h_{eff}^2 \cos^2 \theta}{3\sin \theta(2\lambda X - h_{eff} \cos \theta)}, \quad (12)$$

$$y_{0,c} = \frac{h_{eff}}{3} \cdot \frac{3\lambda X - 2h_{eff} \cos \theta}{2\lambda X - h_{eff} \cos \theta}. \quad (13)$$

Після підстановки виразів (12) і (13) у вираз (11) отримаємо квадратне рівняння відносно  $ctg\theta$ , розв'язком якого буде формула, що дозволяє обчислювати кут  $\theta$  нахилу нейтральної лінії для трапецієподібної форми стисної зони бетону при повному вичерпанні міцності бетону на стиск:

$$ctg\theta = -tg\beta \pm \sqrt{tg^2\beta + \frac{24tC}{h_{eff}^2}}, \quad (14)$$

де

$$t = d_b - \frac{C}{2} - tg\beta \left( d_h - \frac{h_{eff}}{2} \right); \quad C = \frac{f_{pd} A_p}{\eta f_{cd} h_{eff}}.$$

Таким чином, у результаті теоретичних досліджень отримано аналітичні залежності (8), (9), (14) для визначення всіх невідомих параметрів ( $\theta$ ,  $X$ ,  $M_{Rd,y}$ ) при розв'язанні задач міцності косозігнутих балок таврового профілю для трапецієподібної форми стиснутої зони бетону.

**Висновки.** Розроблена методика розрахунку несучої здатності косозігнутих підкранових балок у нормальному перерізі за спрощеною деформаційною моделлю дозволяє виконувати розрахунки з інженерною простотою та повною мірою відповідає вимогам чинних нормативних документів [1–3].

### Список використаних джерел

1. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд [Текст] : ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. – К. : Мінрегіонбуд України, 2012. – 312 с.
2. Конструкції будинків та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст] : ДБН В.2.6-98:2009 / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
3. Конструкції будинків та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст] : ДСТУ Б В.2.6-156:2010 / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
4. Павліков, А. М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косозавантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії [Текст] : монографія / А. М. Павліков. – Полтава, 2007. – 320 с.
5. Бойко, О. В. Оцінка міцності навскісно зігнутих балок на основі дволінійних діаграм деформування бетону та арматури [Текст] : дис... канд. техн. наук: спец. 05.32.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / О. В. Бойко. – Полтава, 2010. – 232 с.
6. Кочкар'єв, Д. В. Проектування залізобетонних елементів прямокутного профілю за косоного згину на основі методу розрахункових опорів залізобетону [Текст] / Д. В. Кочкар'єв, В. І. Бабич // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки». – Рівне, 2015. – Вип. 3 (71). – С. 171–175.
7. Павліков, А. М. Розмежування форм стиснутої зони бетону в перерізі косозігнутих балок таврового профілю [Текст] / А. М. Павліков, О. В. Бойко, М. О. Харченко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса : ОДАБА, 2012. – Вип. 47, Ч. 1. – С. 255–260.
8. Павліков, А. М. Міцність косозігнутих залізобетонних балок таврового профілю за умови дволінійної роботи бетону та арматури [Текст] / А. М. Павліков, О. В. Бойко,

М. О. Харченко // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. праць. – Полтава : ПолтНТУ, 2011. – Вип. 2 (30). – С.33–37.

9. Rodrigues, R. Vaz. A new technique for ultimate limit state design of arbitrary shape RC sections under biaxial bending [Text] / R. Vaz Rodrigues // Engineering Structures, 2015. – Vol. 104. – P. 1–17.

10. Sfakianakis, M. G. Biaxial bending with axial force of reinforced, composite and repaired concrete sections of arbitrary shape by fiber model and computer graphics [Text] / M. G. Sfakianakis // Advances in Engineering Software. – 2002. – Vol. 33. – Issue 4. – P. 227–242.

11. Bonet, J. L. A fast stress integration algorithm for reinforced concrete sections with axial loads and biaxial bending [Text] / J. L. Bonet, M. L. Romero, P. F. Miguel, M. A. Fernandez // Computers & Structures. – 2004. – Vol. 82. – Issues 2–3. – P. 213–225.

12. Bonet, J. L. Comparative study of analytical and numerical algorithms for designing reinforced concrete sections under biaxial bending [Text] / J. L. Bonet, M.H.F.M. Barros, M. L. Romero // Computers & Structures. – 2006. – Vol. 84. – Issues 31–32. – P. 2184–2193.

---

Гарькава Ольга Вікторівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського Національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (067) 450-0-370. E-mail: olga-boiko@ukr.net.

Баріляк Богдан Андрійович, магістр, здобувач кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського Національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (095) 928-30-75. E-mail: barylyak\_bogdan@ukr.net.

Гарькава Ольга Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций и сопротивления материалов Полтавского Национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. : (067) 450-0-370. E-mail: olga-boiko@ukr.net.

Баріляк Богдан Андреевич, магистр, соискатель кафедры железобетонных и каменных конструкций и сопротивления материалов Полтавского Национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел.: (095) 928-30-75. E-mail: barylyak\_bogdan@ukr.net.

Harkava Olha, Cand. of techn. sciences, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures and Strength of Materials of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel.: (067) 450-0-370. E-mail: olga-boiko@ukr.net.

Barylyak Bogdan, Master, Applicant of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures and Strength of Materials of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel.: (095) 928-30-75. E-mail: barylyak\_bogdan@ukr.net.

Статтю прийнято 24.02.2018 р.



УДК 624.012:539.43

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ  
ДВОПРОЛЕТНИХ НЕРОЗРІЗНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ЗА ДІЇ  
МАЛОЦИКЛОВИХ ПОВТОРНИХ І ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Канд. техн. наук Г. Х. Масюк, асп. О. В. Ющук,  
студенти О. А. Шайдюк, С. І. Дзюбак (НУВГП)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
ДВОХПРОЛЕТНЫХ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ  
ДЕЙСТВИИ МАЛОЦИКЛОВЫХ ПОВТОРНЫХ И ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ  
НАГРУЗОК**

Канд. техн. наук Г. Х. Масюк, асп. А. В. Ющук,  
студенты А. А. Шайдюк, С. И. Дзюбак (НУВХП)

**EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE BEARING CAPACITY OF TWO-PASS'S  
NON-SEPARABLE REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER THE INFLUENCE OF  
LOW-CYCLIC REPETITIVE AND SIGN-LOADED LOADINGS**

Candidate of technical sciences H. Kh. Masyuk, post-graduate students O.V. Yuschuk,  
students O. A. Shaidyuk, S. I. Dzyubak

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127172

---

*Наведено результати випробувань двопрольотних нерозрізних залізобетонних балок за дії малоциклових повторних і знакозмінних навантажень, у яких виявлено особливості зміни опорних реакцій, згинальних моментів і деформацій бетону та арматури. Установлено, що процес зміни вказаних параметрів стабілізується на 5-6 циклах навантаження. Результати випробувань показали, що малоциклові повторні і знакозмінні навантаження впливають на несучу здатність, зменшуючи її порівняно з однозначним статичним навантаженням.*

**Ключові слова:** залізобетонні двопрольотні балки, малоциклові повторні і знакозмінні навантаження, несуча здатність.

*Приведены результаты испытаний двухпролетных неразрезных железобетонных балок при действии малоцикловых повторных и знакопеременных нагрузок, в которых выявлены особенности изменения опорных реакций, изгибающих моментов и деформаций бетона и арматуры. Установлено, что процесс изменения указанных параметров стабилизируется на 5-6 циклах нагрузок. Результаты испытаний показали, что малоцикловые повторные и знакопеременные нагрузки влияют на несущую способность, уменьшая ее по сравнению с однозначной статической нагрузкой.*

**Ключевые слова:** железобетонные двухпролетные балки, малоцикловые повторные и знакопеременные нагрузки, несущая способность.

*The results of tests of the bearing capacity of two-pass's non-separable reinforced concrete beams under the influence of low-cyclic repetitive and sign-loaded loadings, in which features of change of reference reactions, bending moments and deformations of concrete and reinforcement are revealed. It is established that the process of changing these parameters is stabilized by 5-6 load cycles. The changes in the voltage of the deformed state of normal and inclined sections of*

*experimental samples by the values of the indicated loads are also revealed and analyzed. Test results showed that there has been repeated cyclic alternating loadings and impact on the carrying capacity, reducing its straightforward compared to static loadings. The reasons of the bearing capacity's reducing are determined by the concrete tension of both extended and compressed zones, as well as the formation of microcracks in concrete even at high loadings' levels. Taking into account the specified features of changing the stress-strain state for the above-mentioned loadings will increase the reliability of reinforced concrete non-separable constructions during their operation.*

**Key words:** reinforced concrete double-conductor beams, low-cycle repeated and sign-exchange loadings, bearing capacity.

**Вступ.** Залізобетонні нерозрізні балки досить широко використовуються при зведенні різних будівель і споруд, а саме в монолітних перекриттях багатоповерхових промислових і громадських будівель, у монолітних перекриттях підземних резервуарів, у перекриттях паркінгів для автомобілів і т. п. Нерозрізні балки перекриттів вище вказаних будівель і споруд зазнають у процесі експлуатації малоциклових повторних і знакозмінних навантажень, але робота їх вивчена недостатньо. Слід зазначити, що існуюча методика розрахунку нерозрізних балок не враховує дії вище вказаних навантажень і їх впливу на несучу здатність. Виходячи з цього, питання експериментальних досліджень роботи нерозрізних конструкцій за дії малоциклових повторних і знакозмінних навантажень є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Досить значна кількість науковців досліджували роботу нерозрізних залізобетонних балок при однозначних статичних навантаженнях. Це висвітлено в роботах [8-17]. Дослідження роботи нерозрізних залізобетонних балок за дії малоциклових повторних навантажень відображено в роботах [1, 6]. У вище вказаних працях досліджувались різні параметри роботи нерозрізних залізобетонних балок, а саме міцність нормальних і похилих перерізів; деформативність і тріщиностійкість; прогини і ширина розкриття тріщин та ін.

Дослідження ж роботи нерозрізних залізобетонних навантажень взагалі відсутні.

**Мета і задачі досліджень.** Завданням статті є визначення на основі експериментальних досліджень несучої здатності нерозрізних двопрольотних балок за дії малоциклових повторних і знакозмінних навантажень.

**Основна частина тексту.** У діючих нормативних документах [18, 19] розрахунок статично невизначених залізобетонних конструкцій не враховує передісторію і характер навантажень. Але ж у реальних умовах ряд статично невизначених конструкцій, зокрема нерозрізні балки, зазнають малоциклових повторних і знакозмінних навантажень різної інтенсивності.

У лабораторії кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд було проведено експериментальні дослідження роботи і напружено-деформованого стану двопрольотних нерозрізних балок за дії малоциклових повторних і знакозмінних навантажень. Балки виготовлялись із важкого бетону класу C25/30 і армувались двома зварними каркасами. Робоча арматура – два стрижні діаметром 12 мм класу A400, поперечна арматура класу A240 діаметром 6 мм. Армуння балок подвійне симетричне. Крок поперечних стрижнів на припорних ділянках 100 мм, а в прольоті – 200 мм. Нерозрізні двопрольотні балки з однаковими прольотами по 1500 мм і розмірами поперечного перерізу 100x160 мм. Випробування балок здійснювалось за допомогою спеціальної силової траверси з використанням гідравлічного преса ПГ-200. Балки завантажувались чотирма зосередженими

силами, по дві сили в кожному прольоті, які прикладалися за схемою, показаною на рис. 1. Конструктивна схема випробування балок наведена на рис. 2.

На рис. 1 також показано розташування вимірювальних приладів, які використовувались при випробуванні балок.

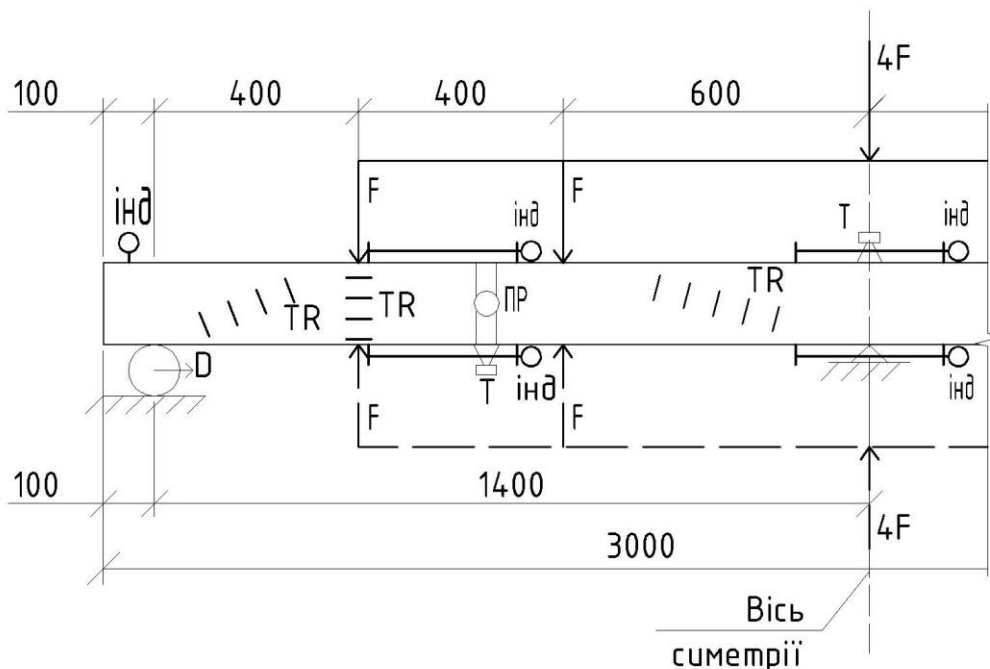


Рис. 1. Схема прикладення сил і розташування вимірювальних приладів

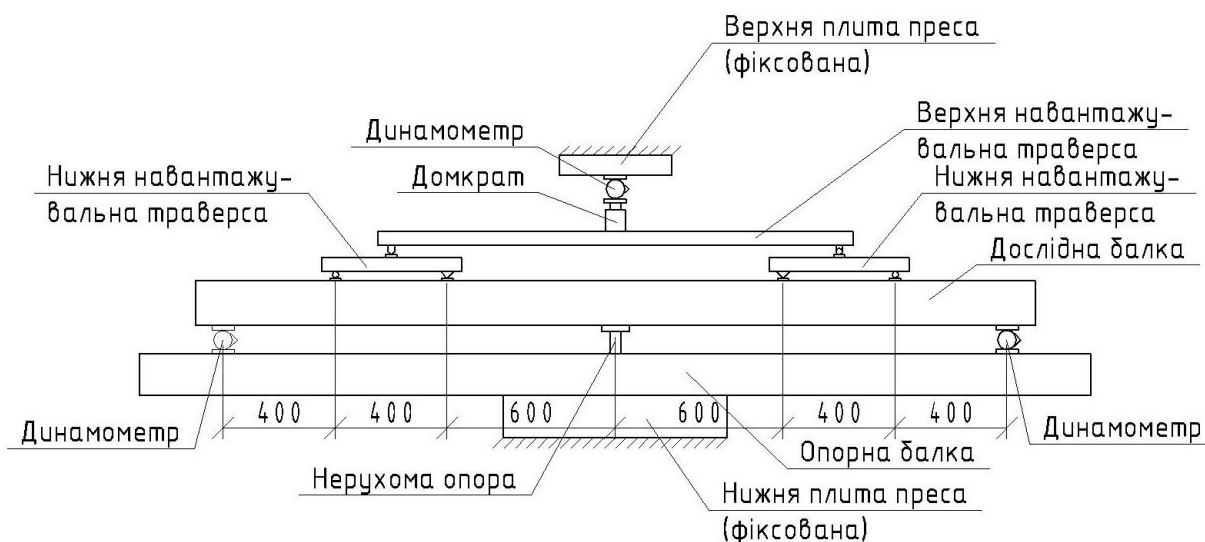


Рис. 2. Схема випробування двопрольотних балок

Випробування балок здійснювалось одноразовим статичним навантаженням до руйнування для визначення рівнів наван-

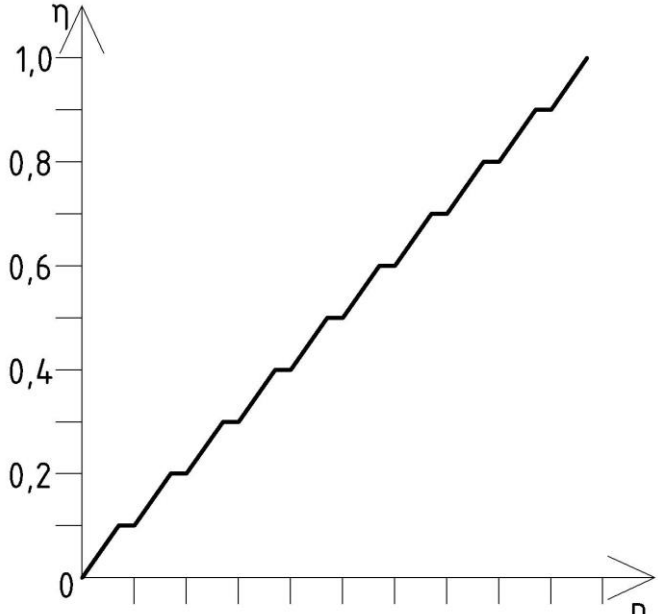
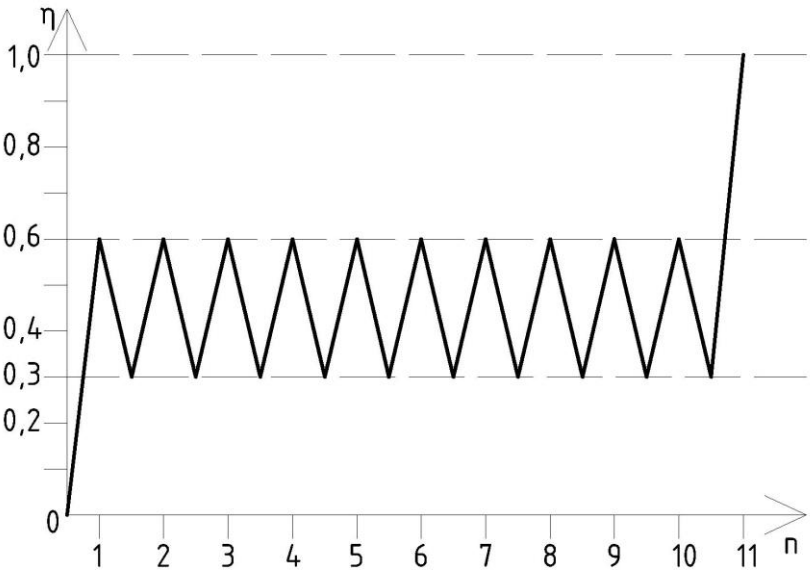
тажень, а також малоциклових повторних навантажень різних рівнів і малоциклових знакозмінних навантажень. Кількість

циклів за дії малоциклових навантажень було прийнято десять і після десяти циклів балки доводились до руйнування. Схеми

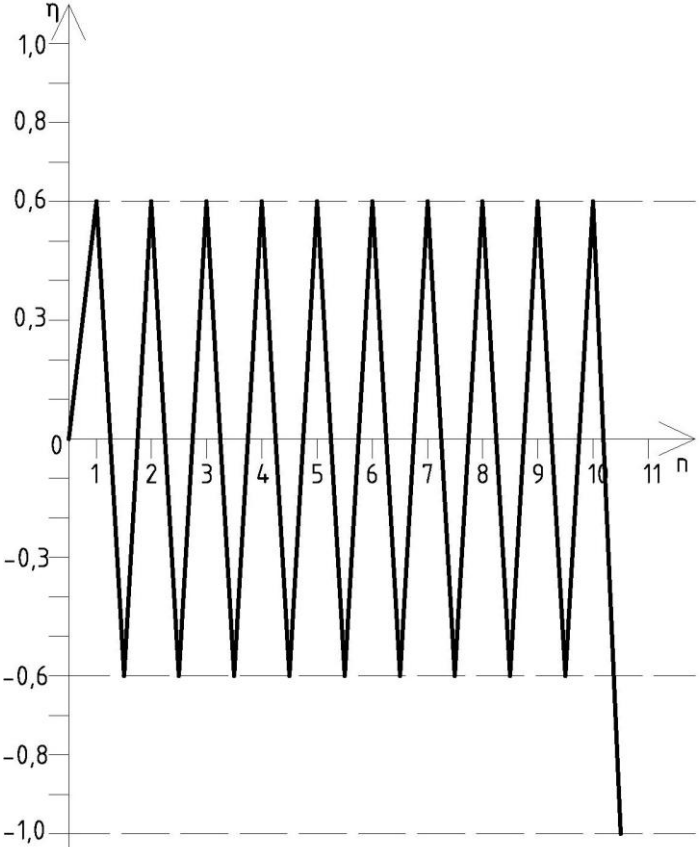
режимів навантажень балок наведені в табл. 1. У кожному режимі навантажень було випробувано по три зразки-близнюки.

Таблиця 1

Схема режимів навантаження балок

Шифр балок	Режим навантаження	Вид навантаження
1	2	3
БОС-1 БОС-2 БОС-3		Одноразове короткочасне, ступінчасте до руйнування
БМЦП-1 БМЦП-2 БМЦП-3		Короткочасне, малоциклове повторне навантаження, рівень 0,6 з руйнуванням після десяти циклів

Продовження табл. 1

1	2	3
БМЦЗН-1 БМЦЗН-2 БМЦЗН-3		Короткочасне, малоциклове знаковмінне навантаження, рівень 0,6 з руйнуванням після десятого циклу

У процесі випробування балок вимірювались деформації бетону і арматури, прогини балок і можливе переміщення крайніх опор. Деформації бетону вимірювались індикаторами годинникового типу з ціною поділок 0,001 мм на базі 200 мм і тензорезисторами з базою 50 мм, наклеєних ланцюжками в прольотах, де виникали максимальні додатні згинальні моменти під першою силою від крайньої опори і максимальні від'ємні моменти під центральною опорою, а також у похилих перерізах від опори до місць прикладення сил на балку. Деформації арматури вимірювались за допомогою тензометрів Гугенберґера на базі 20 мм з ціною поділок 0,001 мм і тензорезисторів на базі 20 мм, які наклеювались на арматурні стрижні. Прогини балок вимірювали прогиномірами

типу 6 ПАО ЛИСИ з ціною поділок 0,01 мм. За індикаторами годинникового типу визначали переміщення крайніх опор. За появою тріщин у процесі випробування балок спостерігали візуально та за допомогою мікроскопа МПБ-3 з ціною поділки 0,002 мм. На кожному напівциклі завантажень на гранях балок відмічали висоту розвитку нормальних  $h_w$  і довжину похилих тріщин  $l_w$ . Використання даної методики проведення експериментальних досліджень роботи балок з розробленим устаткуванням і використанням сучасних вимірювальних приладів дозволило дослідити за дії вище зазначених навантажень реальний напружено-деформований стан нормальних і похилих перерізів балок і його зміну в процесі випробування.

Механізм деформування, тріщиноутворення та руйнування нерозрізних балок

суттєво відрізняється від роботи однопрольотних залізобетонних згинальних елементів навіть при однозначному статичному навантаженні (при першому напівциклі). Зі зростанням навантаження спочатку з'являються нормальні тріщини над середньою опорою в зоні дії максимального моменту, потім у прольотах між зосередженими силами і в прольотах зрізу розтягнутої зони. Похилі тріщини з'явилися при навантаженні, яке в середньому у 2,5 разу перевищує навантаження, при якому утворюються нормальні тріщини. Все це фіксувалось при завантаженні балок на 1-му напівциклі при малоциклових повторних і знакозмінних навантаженнях. При подальших циклічних завантаженнях з кожним циклом напружено-деформований стан балок змінювався. Це прослідковувалось зі зростанням деформацій і тріщиноутворень в експериментальних зразках. Якщо порівнювати напружено-деформований стан балок за дії малоциклових повторних і малоциклових знакозмінних навантажень,

то тут також є суттєва відмінність. Утворення і розвиток тріщин, які перетинали практично весь переріз, було більш характерним за своєю появою значеннями зі збільшенням циклів. Після зміни знака зусиль мікротріщини утворювались інтенсивніше, з'єднувались між собою і утворювали магістральні тріщини. Після утворення умовного пластичного шарніра під середньою опорою (напруження в робочій арматурі досягли межі текучості) має місце перерозподіл внутрішніх зусиль з різким збільшенням згинальних моментів у прольотах з отриманням максимально можливого значення згинального моменту над середньою опорою. При доведенні балок до руйнування воно відбувалось внаслідок досягнення межі текучості прольотної арматури.

Порівнюючи несучу здатність випробовуваних балок під дією вище зазначених навантажень, слід зазначити, що є суттєва різниця. Значення несучої здатності експериментальних зразків під дією різних видів навантажень наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Середні значення випробовуваних балок

Шифр балок	Величина сили, при якій відбувалось руйнування, F, кН	Значення згинальних моментів при руйнуванні		Режим завантаження
		М прольотні, кНм	М на середній опорі, кНм	
1. БОС	32,5	10,4	14,4	Однозначне статичне до руйнування
2. БМЦП	30,0	9,64	13,3	Короткочасне малоциклове повторне, після десяти циклів до руйнування
3. БМЦЗН	27,5	8,84	12,2	Короткочасне малоциклове знакозмінне, руйнування після 10-ти циклів

**Висновки.** На основі проведених експериментальних досліджень виявлено, що малоциклові повторні навантаження зменшують несучу здатність на 8 %, а при

малоциклових знакозміних – на 16 %, що необхідно враховувати при розрахунках згинальних елементів, які зазнають таких навантажень.

### *Список використаних джерел*

1. Масюк, Г. Х. Експериментальні дослідження перерозподілу зусиль в двох пролітних нерозрізних залізобетонних балках при повторних навантаженнях [Текст] / Г. Х. Масюк, В. Є. Бабич // Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. – Рівне : УДУВГП, 2002. – Вип. 4(17). – С. 165-173.
2. Бабич, В. Є. Напружено-деформований стан нерозрізних залізобетонних балок з урахуванням повної діаграми деформування бетону [Текст] / В. Є. Бабич // Наук. вісник буд-ва. – Харків : ХТУБА, 1999. – Вип. 7. – С. 101-107.
3. Масюк, Г. Х. Розрахунок міцності нормальних перерізів нерозрізних залізобетонних балок при повторних навантаженнях на основі деформаційної моделі [Текст] / Г. Х. Масюк, В. Є. Бабич // Будівельні конструкції : міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. праць. – К. : НДІБК, 2004. – С. 659-664.
4. Бабич, В. Є. Особливості роботи нерозрізних залізобетонних балок, армованих сталлю без площадки текучості, з урахуванням повторних навантажень [Текст] / В. Є. Бабич // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : УДУВГП, 2002. – Вип. 8. – С. 47-55.
5. Савицький, В. В. Експериментальні дослідження прогинів та ширин розкриття тріщин у збірно-монолітних нерозрізних залізобетонних балках при дії повторних навантажень [Текст] / В. В. Савицький // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : УДУВГП, 2003. – Вип. 9. – С. 303-310.
6. Бабич, Є. М. Удосконалення розрахунку нерозрізних залізобетонних балок з використанням деформаційної моделі нормальних перерізів [Текст] / Є. М. Бабич, В. Є. Бабич // Таврійський наук. зб. – Херсон, 1999. – Вип. 11, ч. 3. – С. 18-24.
7. Бабич, Є. М. Міцність і деформативність важкого бетону при малоцикловому стисненні [Текст] / Є. М. Бабич, Н. І. Ільчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : УДУВГП, 2003. – Вип. 9. – С. 166-123.
8. Дорофеев, В. С. Прочность, трещиностойкость и деформативность неразрезных железобетонных балок [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Е. Н. Крантовская. – Одесса : Эвен, 2010. – 175 с.
9. Дорофеев, В. С. Розрахунок міцності нерозрізних балок з використанням деформативної моделі [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, О. М. Крантовська // Механіка руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: зб. наук. праць. – Львів : Каменярь, 2007. – Вип. 7. – С. 223-237.
10. Дорофеев, В. С. Тріщиностійкість нерозрізних балок [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, О. М. Крантовська // Теорія і практика будівництва: Вісник нац. унів-ту «Львівська політехніка». – Львів, 2007. – № 600. – С. 92-100.
11. Прочность наклонных сечений неразрезных железобетонных балок [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Е. Н. Крантовская [и др.] // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2006. – Вип. 24. – С. 85-94.
12. Дорофеев, В. С. Основные параметры несущей способности наклонных сечений неразрезных железобетонных балок в местах смены знака и величины изгибающего момента [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Е. Н. Крантовская // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2007. – Вип. 15. – С. 150-160.

13. Особенности напряженно-деформированного состояния неразрезных железобетонных балок и расчета прочности наклонных сечений [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Е. Н. Крантовская, Ф. Р. Карпюк // Будівельні конструкції: міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво). – К. : НДІБК, 2010. – Вип. 73. – С. 151-163.
14. Деформативность материалов неразрезных железобетонных [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Е. Н. Крантовская, А. М. Бреднёв // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2010. – Вип. 38. – С. 246-254.
15. Дорофеев, В. С. Расчет прогибов неразрезных железобетонных балок [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Е. Н. Крантовская // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2010. – Вип. 20. – С. 193-204.
16. Розрахунок міцності похилих перерізів нерозрізних залізобетонних балок [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, О. М. Крантовська, М. М. Петров // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2009. – Вип. 19. – С. 138-139.
17. Дорофеев, В. С. Напряженное состояние продольной арматуры и перераспределение изгибающих моментов в неразрезных железобетонных балках [Текст] / В. С. Дорофеев, В. М. Карпюк, Е. Н. Крантовская // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2011. – Вип. 21. – С. 2015-223.
18. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 97 с.
19. ДСТУ Б.В.2.6-156. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції із важкого бетону. Правила проектування [Текст]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.

---

Масюк Григорій Харитонович, кандидат технічних наук, професор кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та інженерних споруд. Тел.: (068) 002-47-20.

Ющук Олександр Віталійович, аспірант кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та інженерних споруд. Тел.: (098) 703-14-20.  
Шайдюк Олександр Андрійович, магістр кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та інженерних споруд. Тел.: (096) 722-21-23.  
Дзюбак Сергій Іванович, магістр кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та інженерних споруд. Тел.: (097) 166-26-74.

Масюк Григорий Харитонович, кандидат технических наук, профессор кафедры промышленного, гражданского строительства и инженерных сооружений Национального университета водного хозяйства и инженерных сооружений. Тел.: (068) 002-47-20.

Ющук Александр Витальевич, аспирант кафедры промышленного, гражданского строительства и инженерных сооружений Национального университета водного хозяйства и инженерных сооружений. Тел.: (098) 703-14-20.  
Шайдюк Александр Андреевич, магистр кафедры промышленного, гражданского строительства и инженерных сооружений Национального университета водного хозяйства и инженерных сооружений. Тел.: (096) 722-21-23.  
Дзюбак Сергей Иванович, магистр кафедры промышленного, гражданского строительства и инженерных сооружений Национального университета водного хозяйства и инженерных сооружений. Тел.: (097) 166-26-74.

Hryhoriy Kharytonovych Masyuk, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial, Civil Engineering and Engineering Structures, National University of Water and Environmental Engineering. Tel.: (068) 002-47-20.

Olexandr Vitaliyovych Yushchuk, postgraduate student of the Department of Industrial, Civil Engineering and Engineering Structures, National University of Water and Environmental Engineering. Tel.: (098) 703-14-20.  
Olexandr Andriyovych Shaidyuk, master of the Department of Industrial, Civil Engineering and Engineering Structures, National University of Water and Environmental Engineering. Tel.: (096) 722-21-23.  
Sergiy Ivanovych Dzyubak, master of the Department of Industrial, Civil Engineering and Engineering Structures, National University of Water and Environmental Engineering. Tel.: (097) 166-26-74.

Статтю прийнято 19.02.2018 р.



УДК 624.016

## ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО УСИЛЕНИЮ ПОВРЕЖДЕННЫХ КИРПИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Кандидаты техн. наук О. В. Кичаева (ХНУГХ),  
С. Н. Стародубов, А. В. Убийвовк (ХНУСА)

## ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПІДСИЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНИХ ЦЕГЛЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Кандидати техн. наук О. В. Кічаєва (ХНУМГ),  
С. М. Стародубов, А. В. Убийвовк (ХНУБА)

## PROPOSALS FOR STRENGTHENING DAMAGED BRICK CONSTRUCTIONS

PhD. tehn. science O. V. Kichaeva, S. N. Starodubov, A. V. Ubiyvovk

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127174

---

*В статье изложены результаты экспериментальных исследований поврежденных трещинами кирпичных столбов, усиленных железобетонными обоймами с армированием в виде просечно-вытяжного листа. Полностью изложена последовательность технологического процесса усиления конструкций. Показано, что несущая способность такой комплексной конструкции выше первоначальной конструкции кирпичного столба в 1,4 раза, нагрузка трещинообразования такой конструкции выше в 1,07 раза.*

**Ключевые слова:** кирпичный столб, железобетонная обойма, просечно-вытяжной лист.

*У статті викладено результати експериментальних досліджень пошкоджених тріщинами цегляних стовпів, підсилені залізобетонними обоймами з армуванням у вигляді просічно-витяжного листа. Повністю викладено послідовність технологічного процесу підсилення. Показано, що несуча здатність такої комплексної конструкції вище від початкової конструкції цегляного стовпа в 1,4 рази, навантаження тріщиноутворення такої конструкції вище в 1,07 рази.*

**Ключові слова:** цегляний стовп, залізобетонна обойма, просічно-витяжний лист.

*In the process of exploitation of a brick construction by virtue of different reasons there are cracks of different kind, however, after strengthening of constructions, they can be exploited further. The most effective and widespread method of strengthening of existent stone constructions is taking them in a hoop. Posts and piers with cracks, celled in a hoop, restore the bearing strength fully. Hoops can be next kinds: steel, reinforce-concrete, reinforced solution, from composition materials, like carbon fiber canvases, ribbons and nets, brick and armobrick.*

*With the purpose of partial renewal of bearing strength of the damaged by the main cracks brick posts their reinforcement by reinforce-concrete hoop is offered. Re-enforcement is executed as an expanded metal, and piling of concrete solution was produced by guniting. The sequence of technological process of strengthening of brick constructions is fully expounded.*

*It is shown that bearing strength of such complex construction is 1,4 times higher than primary construction of brick post, loading of cracking of such construction is 1,07 times higher. At this strengthening reinforce-concrete re-enforcement works only, and a brick kernel only performs the duty of filling, although loading is passed through a kernel.*

**Keywords:** brick post, reinforce-concrete hoop, expanded metal.

**Введение.** В процессе эксплуатации конструкции из кирпича в силу различных причин возникают трещины различного вида, однако после усиления конструкций они могут эксплуатироваться далее [1]. Наиболее эффективным и широко распространенным способом усиления существующих каменных конструкций является взятие их в обойму. В обойме кирпичная кладка будет работать в условиях всестороннего сжатия, а также невозможности ее поперечного расширения. Столбы и простенки с трещинами, заключенные в обойму, полностью восстанавливают свою несущую способность. К тому же наиболее эффективной является работа той обоймы, на которую предусмотрена передача нагрузки (в случае если обойма ограничена верхними и нижними конструкциями), тогда она не только сдерживает поперечное расширение кладки, но и воспринимает часть нагрузки, разгружая усиливаемый элемент.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Обоймы могут быть следующих видов:

- 1) стальная [2];
  - 2) железобетонная [3];
  - 3) армированная растворная [3];
  - 4) из композиционных материалов – углепластиковые холсты, ленты и сетки [4];
  - 5) кирпичные и армокирпичные [5].
- Каменную конструкцию заключают в обойму из кирпича толщиной  $\frac{1}{4}$  кирпича (на ребро), а в швы по периметру усиливаемой конструкции вводится замкнутая арматура, которая воспринимает случайные поперечные растягивающие усилия.

Недостатками обоем типов 1–3 являются высокая трудоемкость, низкая устойчивость к влиянию агрессивной среды; низкая огнестойкость. Недостатки обоем типа 4 – низкая устойчивость к высоким температурам; технологическая сложность, высокая стоимость. Обоймы типа 1 и 5 значительно меняют геометрию конструкции в сторону ее увеличения.

**Определение цели и задачи исследования.** С целью частичного восстановления несущей способности поврежденных трещинами кирпичных столбов предложено их усиление в виде армированной железобетонной обоймы. Армирование выполнено в виде просечно-вытяжного листа, а укладка бетонного раствора производилась торкретированием.

Просечно-вытяжной лист имеет ряд преимуществ перед арматурной сеткой:

- 1) технология изготовления просечно-вытяжного листа обеспечивает заданную величину характеристик жесткости;
- 2) за счет своей геометрической формы реализуется эффект сцепления обоймы с существующей кирпичной конструкцией;
- 3) железобетонная обойма усиления повышает коррозионную и огневую устойчивость данной комплексной конструкции.

**Цель и задачи.** Целью экспериментальных исследований является установление несущей способности поврежденных кирпичных столбов после их усиления бетонной обоймой с просечно-вытяжным листом.

**Основная часть исследования.** Кирпичные столбы Ст-4, Ст-6 и Ст-7 имели следующие повреждения: Ст-4 – магистральные трещины с двух противоположных сторон столба шириной раскрытия 2...3 мм, скол верхнего угла столба. Ст-6 – магистральные трещины шириной раскрытия 7...8 мм по всем сторонам (т. е. образец фактически расколот на 4 части), трещины по кирпичу достигают 6 мм, имеет место скол кирпича на 2–3 ряда (сверху). Ст-7 – магистральные трещины шириной раскрытия до 2 мм с 4 сторон, имеется скол одного из углов (снизу) (рис. 1). Сечение столбов 380 x 380 мм, высота 1,1 м.

Испытываемые образцы – поврежденные столбы Ст-4, Ст-6 и Ст-7 – были усилены в соответствии со следующей технологической процедурой.



Рис. 1. Поврежденные кирпичные столбы Ст-4, Ст-6 и Ст-7

1. Раскрой просечно-вытяжного листа по размеру и высоте столба. Был принят лист из черной стали производства ЕС с размерами ячейки 30 x 23 мм, перемычки

2,5 мм, толщина листа 2 мм, свободная площадь 78 % (рис. 2). Расположение ячеек было принято поперек вертикальной оси столба.

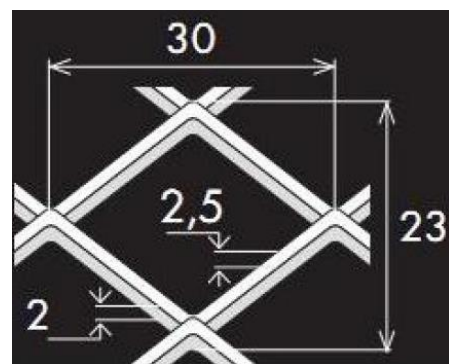
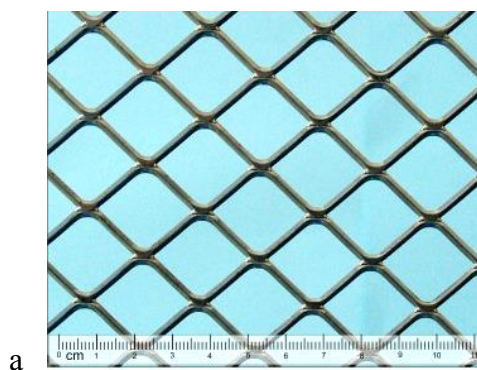


Рис. 2. Используемый в эксперименте просечно-вытяжной лист:  
а – общий вид; б – основные геометрические характеристики

2. Крепеж просечно-вытяжных листов металлическими самоанкерующимися распорными болтами по ГОСТ 28778-90 длиной 85 мм и диаметром 8 мм. На конце болта под гайку устанавливались кузовные

шайбы диаметром 30 мм по ГОСТ 6958-78. Болты устанавливались в два ряда по стороне кирпичного столба с шагом примерно 350 мм (рис. 3).

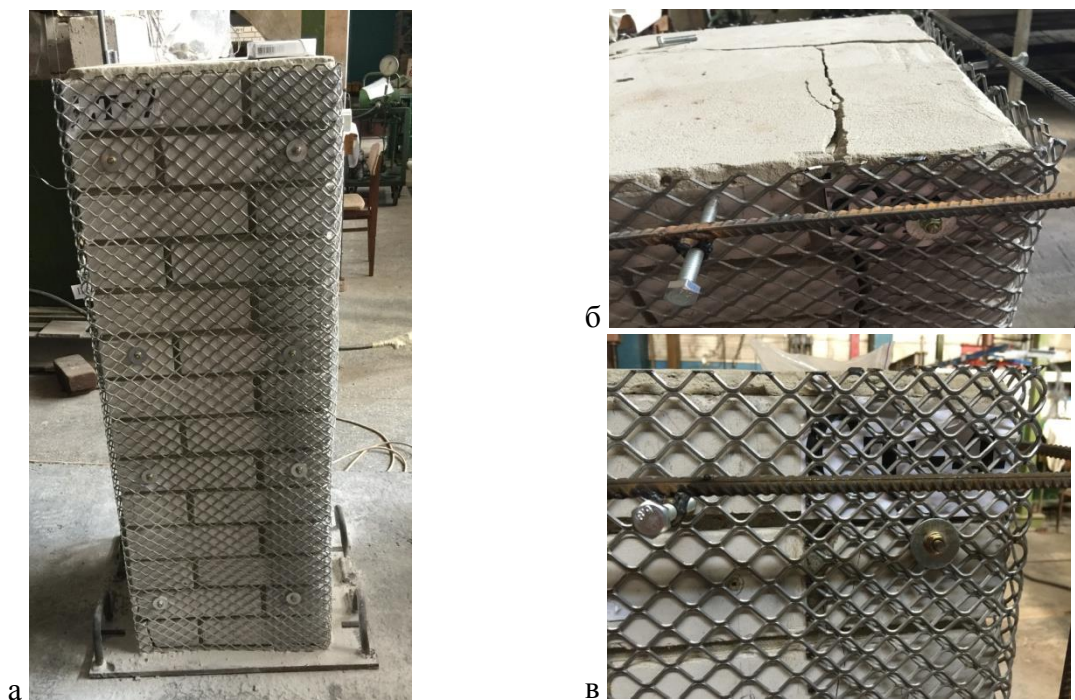


Рис. 3. Крепление просечно-вытяжного листа к столбам

3. Торкретирование. Состав раствора – цемент : щебень : вода – 2:4:6. Применяется щебень фракции 5–10 мм, пластификатор в дозировке 40 гр на 10 кг цемента, а также фибра полипропиленовая в дозировке 0,6 кг на 1 м<sup>3</sup> цемента; портландцемент марки ПЦ

I-500. Применяемое оборудование: бетономешалка на 160 л, растворонагнетатель объемом 90 л и компрессор на 7 атм. Толщина торкрета составила ≈ 50 мм (рис. 4), общий вид столбов после процедуры торкретирования представлен на рис. 5.

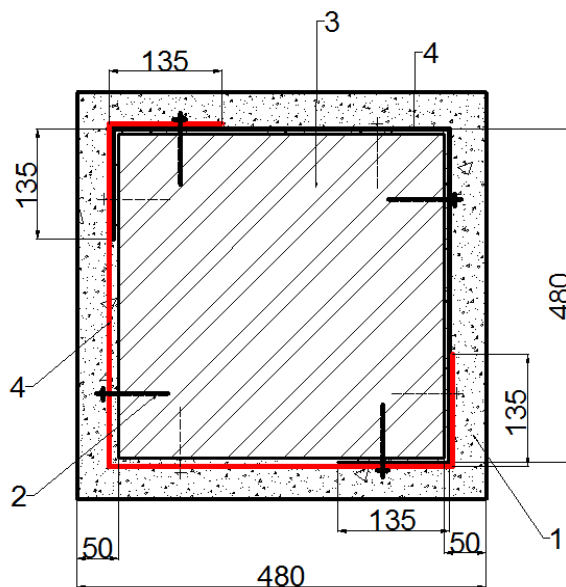


Рис. 4. Поперечное сечение усиленного столба: 1 – слой раствора; 2 – распорные болты; 3 – усиливаемый кирпичный столб; 4 – гнутый просечно-вытяжной лист



Рис. 5. Затретьорированные кирпичные столбы Ст-4, Ст-6, Ст-7

Кирпичные столбики испытывались в следующем возрасте: Ст-7 – 34 дня, Ст-4 – 37 дней, Ст-6 – 42 дня. Экспериментальные исследования кирпичных столбов после усиления были проведены в испытательной лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций Харьковского национального университета строительства и архитектуры в сентябре 2017 года.

Испытания проводились на гидравлическом прессе мощностью 500 т (рис. 6). Образцы в пресс устанавливались таким образом, чтобы их вертикальная ось совпадала с осью приложения нагрузки при центральном сжатии. Нагрузка прикладывалась ступенями по 10,0 т, фиксировалась разрушающая нагрузка и нагрузка трещинообразования.

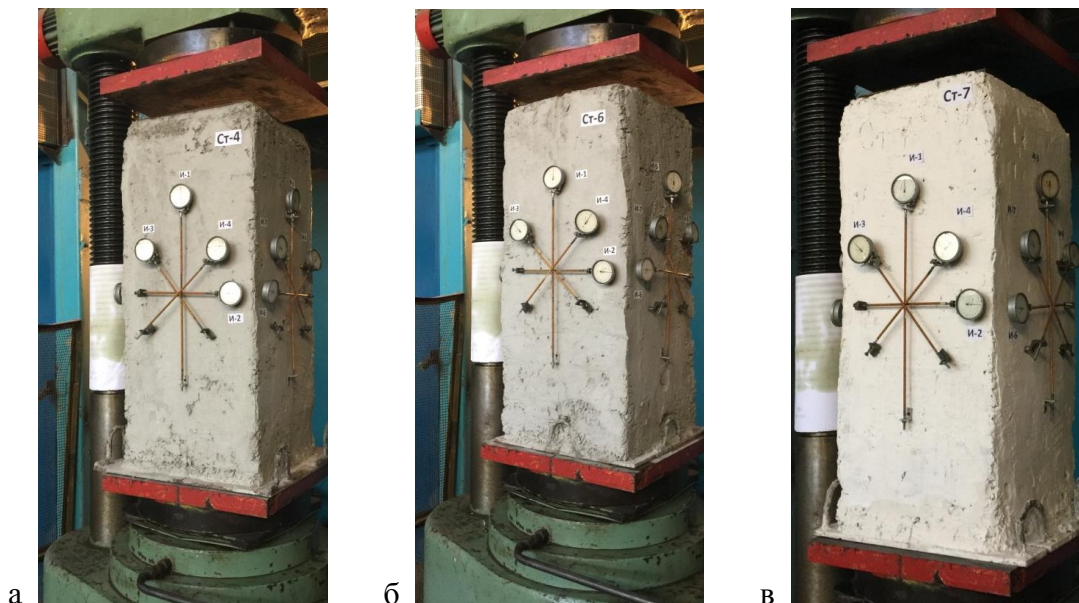


Рис. 6. Фото усиленных столбиков перед испытаниями: а – Ст-4; б – Ст-6; в – Ст-7

Измерения деформаций производились до разрушения образца, при этом определялось среднее значение по двум индикаторам, установленным с двух сторон

образца. Усилие возрастало равномерно; во время снятия отсчетов по приборам нагрузка поддерживалась на постоянном уровне.

Графики зависимости относительных деформаций от ступеней нагружения « $\epsilon - N/N_u$ » усиленных столбов показаны на рис. 7.

По результатам эксперимента можно констатировать, что использование сетчато-дисперсного армирования уменьшает продольные деформации  $\approx$  в 1,5 раза, а поперечные – увеличиваются тоже  $\approx$  в 1,5 раза. Несущая способность уже такой комплексной конструкции выше первоначальной конструкции кирпичного столба в 1,4 раза, нагрузка трещинообразования возросла незначительно – в 1,07 раза.

Следует отметить, что при данном усилении работает только железобетонное армирование, а кирпичное ядро выполняет функцию только заполнения, хотя нагрузка передается через ядро.

Разрушение кирпичных столбов, усиленных сетчато-дисперсным армированием, показаны на рис. 8.

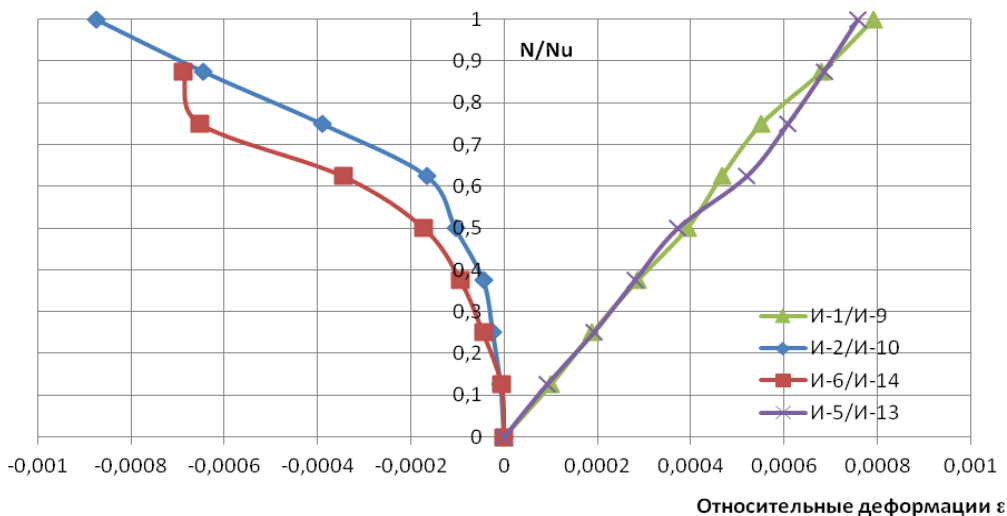


Рис. 7. Графики зависимости относительных деформаций от ступеней нагружения « $\epsilon - N/N_u$ » для усиленных столбов



Рис. 8. Результаты испытаний столбов, усиленных сетчато-дисперсным армированием: а – Ст-4; б – Ст-6; в – Ст-7

**Выводы:**

1. Предложено усиление поврежденного кирпичного столба с использованием железобетонной обоймы с сетчато-дисперсным армированием.

2. Несущая способность такой комплексной конструкции выше первоначальной конструкции кирпичного столба в 1,4 раза, нагрузка трещинообразования возросла в 1,07 раза.

**Список использованных источников**

1. Дефекты и усиление зданий и сооружений [Текст] // Инженерно-строительный журнал (Magazine of Civil Engineering): материалы конференции. – 2013. – №. 3 (38). – С. 3–4 (БД Scopus).

2. Современные способы ремонта и усиления каменных конструкций [Текст] / Р. Орлович, Д. Мантегацца, А. Найчук, В. Деркач // Архитектура, дизайн, и строительство. – СПб., 2010. – № 1(44). – С. 86-87.

3. Иванов, Ю. В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление, восстановление, ремонт [Текст] / Ю. В. Иванов. – М. : Изд-во АСВ, 2012. – С. 314.

4. Грановский, А. В. Повышение сейсмостойкости стен при усилении их композитными материалами [Текст] / А. В. Грановский, Б. К. Джамуев; под ред. В. И. Теличенко и К. И. Ерёмкина. – М., 2011. – С. 130-133.

5. Спосіб підсилення цегляного стовпа цегляною обоймою з використанням з'єднувальної арматури [Текст]: пат. № 94271 Україна; Е04G 23/02 / Клименко С. В., Бадеян Г. В., Білоус І. О. – заявл. 05.05.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 21. – 3 с.

Кичаева Оксана Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, зав. кафедри механіки ґрунтів, фундаментів та інженерної геології Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел.: +380679538406. E-mail: o\_kichaeva@ukr.net.

Стародубов Сергій Миколайович, директор приватного підприємства, фірма «Вертикаль». Тел.: +380675713308. E-mail: Direktor@vertikal.kharkov.ua.

Убийвовк Артем Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки та підземних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: +380671690209. E-mail: quartv@gmail.com.

Кичаева Оксана Владимировна, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедры механики грунтов, фундаментов и инженерной геологии Харьковского национального университета городского хозяйства им. А. М. Бекетова. Тел.: +380679538406. E-mail: o\_kichaeva@ukr.net.

Стародубов Сергей Николаевич, директор частного предприятия, фирма «Вертикаль». Тел.: +380675713308. E-mail: Direktor@vertikal.kharkov.ua.

Убийвовк Артем Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры геотехники и подземных сооружений Харьковского национального университета строительства и архитектуры. Тел.: +380671690209. E-mail: quartv@gmail.com.

Kichaeva Oxana Vladimirovna, Candidate of Technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Soil Mechanics, Foundations and Engineering Geology, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: +380679538406. E-mail: o\_kichaeva@ukr.net.

Starodubov Sergey Nikolaevich, Director of Private enterprise firm "Vertikal". Tel.: +380675713308. E-mail: Direktor@vertikal.kharkov.ua.

Ubijvovk Artem Vladimirovich, Candidate of Technical sciences, Associate Professor, Department of Geotechnics and Underground Structures, Kharkov National University of Building and Architecture. Tel.: +380671690209. E-mail: quartv@gmail.com.

Статтю прийнято 28.02.2018 р.

УДК 624.014

**ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ПРОЛЕТНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПЕРФОРОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА СКЛАДНОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ**

Кандидати техн. наук В. В. Романюк, В. В. Супрунюк

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПРОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ**

Кандидаты техн. наук В. В. Романюк, В. В. Супрунюк

**PECULIARITIES OF CALCULATION OF SPAN CONSTRUCTIONS FROM PERFORATED ELEMENTS AT A COMPLEX STRESS-DEFORMED CONDITION**

Cand. tech. V. V. Romaniuk, V. V. Supruniuk

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127177

---

*Представлено деякі результати власних теоретичних досліджень несучої здатності пролётних перфорованих конструкцій за граничними станами першої групи, а саме сталеві попередньо напруженої арки з верхнім поясом з перфорованого двотавра та прогону покриття Z-подібного профілю та запропоновано формули для обчислення напружень у характерних перерізах елементів конструкцій, які дозволяють точніше враховувати зміну напружено-деформованого стану в перфорованих елементах порівняно з існуючою методикою.*

**Ключові слова:** несуча здатність, напружено-деформований стан, перфорований елемент, арка, прогін.

*Представлены некоторые результаты собственных теоретических исследований несущей способности пролетных перфорированных конструкций по предельным состояниям первой группы, а именно стальной предварительно напряженной арки с верхним поясом из перфорированного двутавра и прогона покрытия Z-образного сечения и предложены формулы для вычисления напряжений в характерных сечениях элементов конструкций, которые позволяют более точно учитывать изменение напряженно-деформированного состояния в перфорированных элементах по сравнению с существующей методикой.*

**Ключевые слова:** несущая способность, напряженно-деформированное состояние, перфорированный элемент, арка, прогон.

*Some results of their own theoretical studies of the carrying capacity of span perforated structures on the limiting states of the first group, namely the steel pre-stressed arch with the upper belt of the perforated twine and the Z-section cross-section run, are presented. The formulas for calculating the stresses in the characteristic sections of the structural elements are proposed, which allow more accurately to take into account the change in the stress-strain state in the perforated elements with the joint action of the bending moment, the transverse and longitudinal forces for the upper belt of the arch, and also with the bending curve for the Z- sections with a slope of the roof from 0 to 25°. The results of calculating the stresses according to the reduced formulas, the results of numerical studies in the program complex "Lira" and the results of the experimental studies have fairly exact convergence, which makes it possible to draw a conclusion on the possibility of applying the proposed method for determining stresses in practice.*

**Key words:** bearing capacity, strain-strain state, perforated element, arch, run.



**Вступ.** Актуальність наведених нижче результатів теоретичних досліджень перфорованих елементів і конструкцій на їх основі обґрунтовується широким використанням у будівництві сталевих конструкцій, у тому числі плоских конструкцій покриття. Висунуті на сьогодні вимоги до забезпечення необхідної несучої здатності конструкцій за одночасного зниження їх маси є підставою для удосконалення існуючих і створення нових конструктивних форм, вивчення їх дійсної роботи і розроблення відповідних методик розрахунку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розрахунок традиційних елементів конструкцій на прості випадки напружено-деформованого стану не викликає особливих ускладнень, а от розрахунок перфорованих профілів має низку особливостей і є досить складним, особливо за сумісної дії згинального моменту, поперечної та поздовжньої сил, а також за дії згинального моменту у двох площинах, тобто за косоного згину. Методика розрахунку перфорованих елементів за пружної роботи наведена в нормах проектування [1, с. 115] і передбачає їх розрахунок як звичайних балок, що послаблені отворами. Але вона придатна для розрахунку лише згинальних елементів і не враховує додаткові деформації, які виникають у стиснуто-згинальних елементах, якими є верхні пояси арок, а також не враховує наявність згинальних моментів у двох площинах у конструкціях прогонів, що розміщені на верхніх поясах кровляних конструкцій, які найчастіше мають ухил у межах  $0...25^0$ . У результаті виникнення складного напружено-деформованого стану в поперечних перерізах таких елементів виникають додаткові напруження і тому виникає необхідність проведення подальших досліджень у цьому напрямку.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою проведення досліджень є:

1) розроблення методики розрахунку перфорованих елементів верхніх поясів перфорованих арок за деформаційною розрахунковою схемою, яка враховує реальні умови їх роботи і додаткові напруження, які виникають у їх перерізах за рахунок деформації форми, що утворюється за дії зовнішнього навантаження;

2) розроблення методики розрахунку перфорованих прогонів покриття Z-подібного профілю, які використовуються в покрівлях з ухилом від  $0^0$  до  $25^0$ , за дії згинального моменту у двох площинах, тобто за косоного згину.

Основними завданнями дослідження є визначення ексцентриситету прикладання поздовжньої сили у верхньому поясі арки; обґрунтування формул для визначення напружень у верхньому поясі арки з урахуванням деформаційної схеми; визначення положення нейтральної осі прогону за косоного згину; обґрунтування формул для визначення напружень у характерних точках поперечного перерізу прогону за косоного згину.

**Основна частина дослідження.** Як дослідні конструкції були прийняті двічі статично невизначна арка прольотом 9 м (рис. 1) і перфорований прогін Z-подібного профілю прольотом 6 м (рис. 2). Арка складається з двосхилого верхнього пояса, елементи якого жорстко з'єднані у гребеневому вузлі, зтяжки для сприйняття зусилля розпору, розпірки для можливості здійснення перерозподілу внутрішніх зусиль по довжині верхнього пояса та підвіски, яка призначена для підтримання зтяжки від провисання під час транспортування та монтажу арки в проектне положення. Елемент верхнього пояса на ділянках між опорним і гребневим вузлами являє собою нерозрізний перфорований стрижень постійної жорсткості. Ухил верхнього пояса прийнятий  $i=0,5$  і характеризується кутом  $\alpha$ . Перфорований прогін виконаний на основі прокатного швелера за ДСТУ 3436–96.

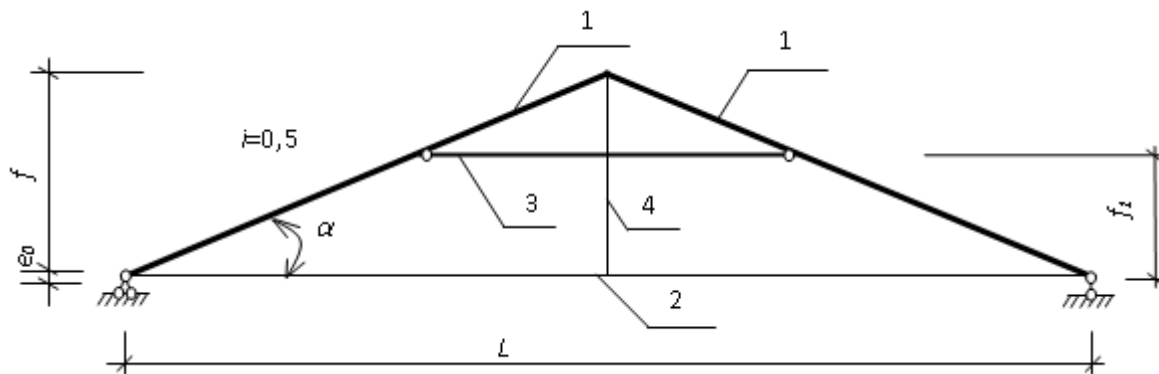


Рис. 1. Схема арки:

1 – елементи верхнього пояса з перфорованого двотавра постійної жорсткості;  
2 – затяжка; 3 – розпірка; 4 – підвіска

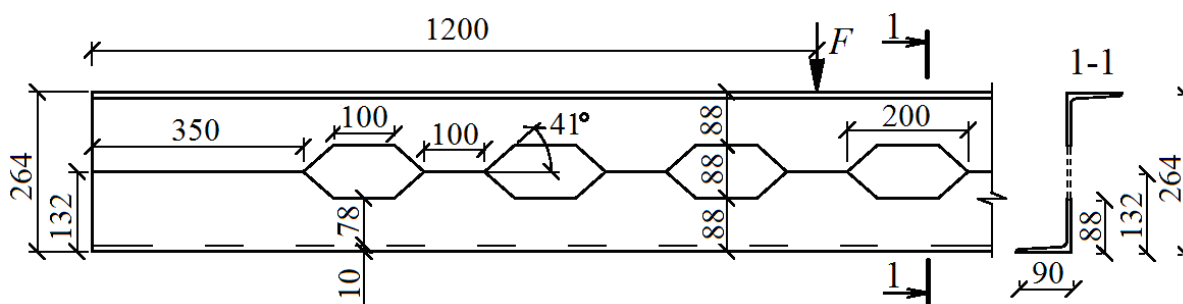


Рис. 2. Фрагмент прогону Z-подібного профілю

Враховуючи наявність прогину верхнього пояса арки, розрахункова модель перфорованого стиснуто-згинального

елемента за деформаційною схемою [2] має вигляд, зображений на рис. 3.

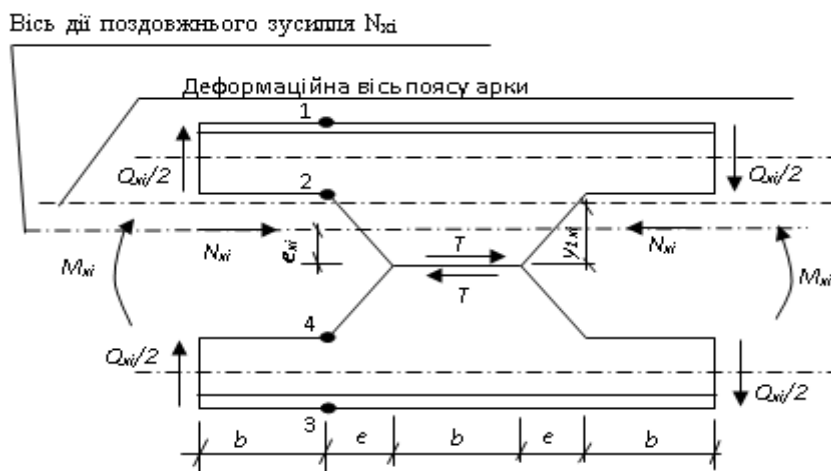


Рис. 3. Розрахункова модель перфорованого стиснуто-згинального елемента за деформаційною схемою

На будь-якій ділянці пояса між точками прикладання зосереджених сил, тобто на ділянці, в межах якої значення  $N_{xi}$  незмінне, приймаючи умову, що елементи арки (напівпояси) деформуються рівномірно по всій довжині між точками закріплення їх у площині арки, максимальний ексцентриситет прикладання поздовжньої сили

$$e_x = \frac{y_{1,xi} \cdot c}{l} \cos \alpha, \quad (1)$$

де  $e_x$  – максимальний ексцентриситет прикладання поздовжньої сили на будь-

якій ділянці пояса між точками прикладання до нього зовнішнього навантаження (рис. 4);

$y_{1,xi}$  – максимальний місцевий прогин стиснуто-згинального елемента;

$c$  – довжина ділянки пояса між точками прикладання зосереджених сил, або довжина ділянки стрижня, у межах якої значення поздовжньої сили  $N_{xi}$  незмінне (як правило, для конструкцій покриття – це відстань між прогонами або ширина плит покриття);

$l$  – довжина поясу між точками закріплення його в площині арки.

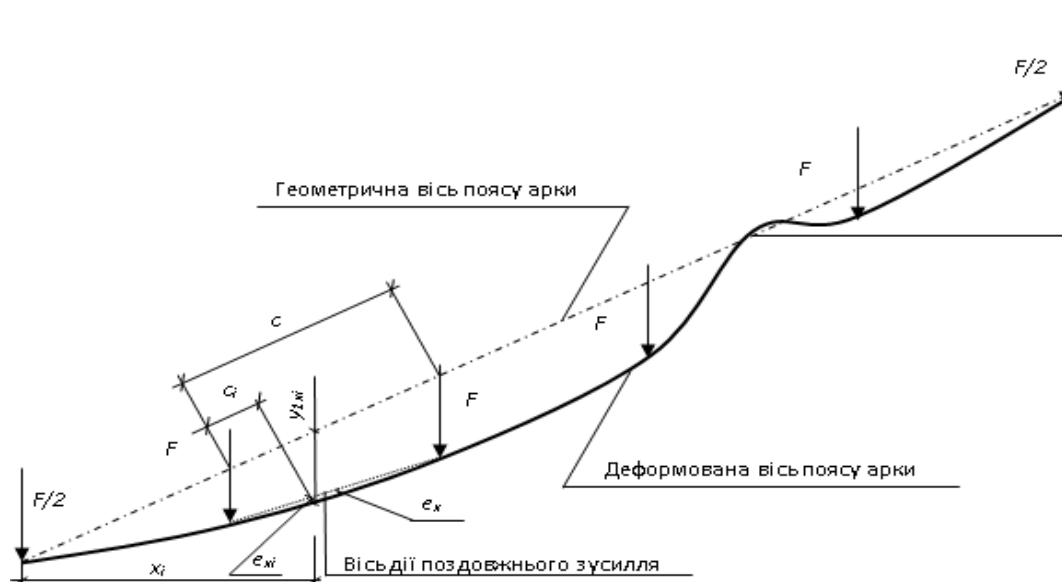


Рис. 4. Деформаційна схема напіварки

Враховуючи, що криволінійна форма деформації на будь-якій ділянці напівпояса арки (рис. 4) близька до трикутної, оскільки найбільший прогин знаходиться посередині, а в місцях прикладання навантаження дорівнює нулю, та з умови подібності трикутників ексцентриситет прикладання поздовжнього зусилля для будь-якого перерізу ділянки напівпояса

$$e_{xi} = \frac{2e_x \cdot c_i}{c}, \quad (2)$$

де  $c_i$  – менша з відстаней від точки прикладання навантаження до перерізу, у якому необхідно визначити ексцентриситет прикладання поздовжнього зусилля.

Тому з урахуванням деформаційної схеми для стиснуто-згинального перфорованого елемента формули для обчислення напружень у розрахункових точках перерізу пояса (точки 1, 2, 3 і 4 на рис. 3) мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1,3} &= \frac{(M_{xi} \pm N_{xi}e_{xi})H}{2I_x} \pm \frac{N_{xi}}{2A_T} + \frac{Q_{xi}bz_1}{4I_1} \leq R_y\gamma_c \\ \sigma_{2,4} &= \frac{(M_{xi} \pm N_{xi}e_{xi})d}{2I_x} \pm \frac{N_{xi}}{2A_T} + \frac{Q_{xi}by_c}{4I_1} \leq R_y\gamma_c \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Прогони покриття у складі покрівлі з певним ухилом працюють в умовах косоного згину [3]. Косим називають такий вид згину, за якого площина дії згинального моменту в даному поперечному перерізі елемента не збігається з жодною з головних центральних осей інерції цього перерізу.

На ділянках 1 і 2 (рис. 5) перфорованого прогону виникатиме косий поперечний згин, оскільки на цих ділянках при-

сутні як згинальний момент, так і поперечна сила, причому на ділянці 1 поперечна сила є найбільшою на всьому прольоті конструкції, а згинальний момент найменшим. Для ділянки 2 ситуація дещо інша – поперечна сила зменшується за одночасного збільшення згинального моменту. На ділянці 3 має місце чистий косий згин, оскільки поперечна сила дорівнює нулю, а згинальний момент є максимальним.

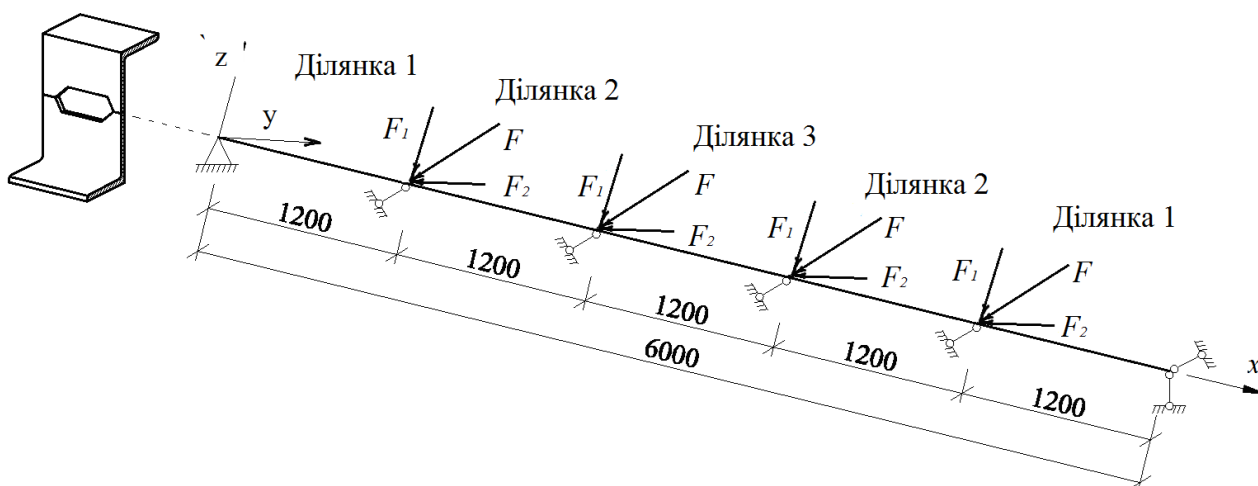


Рис. 5. Розрахункова схема прогону

У поперечних перерізах елемента на ділянках 1 і 2 відносно осі  $z$  виникає згинальний момент  $M_z = F_1x$ , який діє в головній площині  $yx$ , і поперечна сила  $Q_y = -F_1$ . У поперечному перерізі відносно осі  $y$  виникають згинальний момент  $M_y = F_2x$  в головній площині  $zx$  і поперечна сила  $Q_z = -F_2$ . Повний згинальний момент розглядається як поєднання двох прямих згинів

$$M = \sqrt{M_z^2 + M_y^2} \quad (4)$$

і на кожній з цих ділянок діє в площині, яка не збігається з жодною з головних площин перерізу.

Спираючись на принцип незалежності дії сил, повні нормальні напруження в будь-якій точці поперечного перерізу елемента дорівнюють сумі напружень від окремої дії моментів  $M_z$  і  $M_y$

$$\sigma = \sigma_{M_z} + \sigma_{M_y} = \pm(M_z / I_z) y \pm (M_y / I_y) z, \quad (5)$$

де  $y$  і  $z$  – координати точки перерізу, де обчислюють напруження.

На рис. 6, а наведено епюри нормальних напружень  $\sigma_{M_z}$  і  $\sigma_{M_y}$  в поперечному

перерізі ділянки 2 перфорованого Z-подібного профілю (див. рис. 5) від окремої дії згинальних моментів  $M_z$  і  $M_y$ . Епюру  $\sigma$  від сумісної дії моментів  $M_z$  і  $M_y$  зображено в аксонометрії на рис. 6, б.

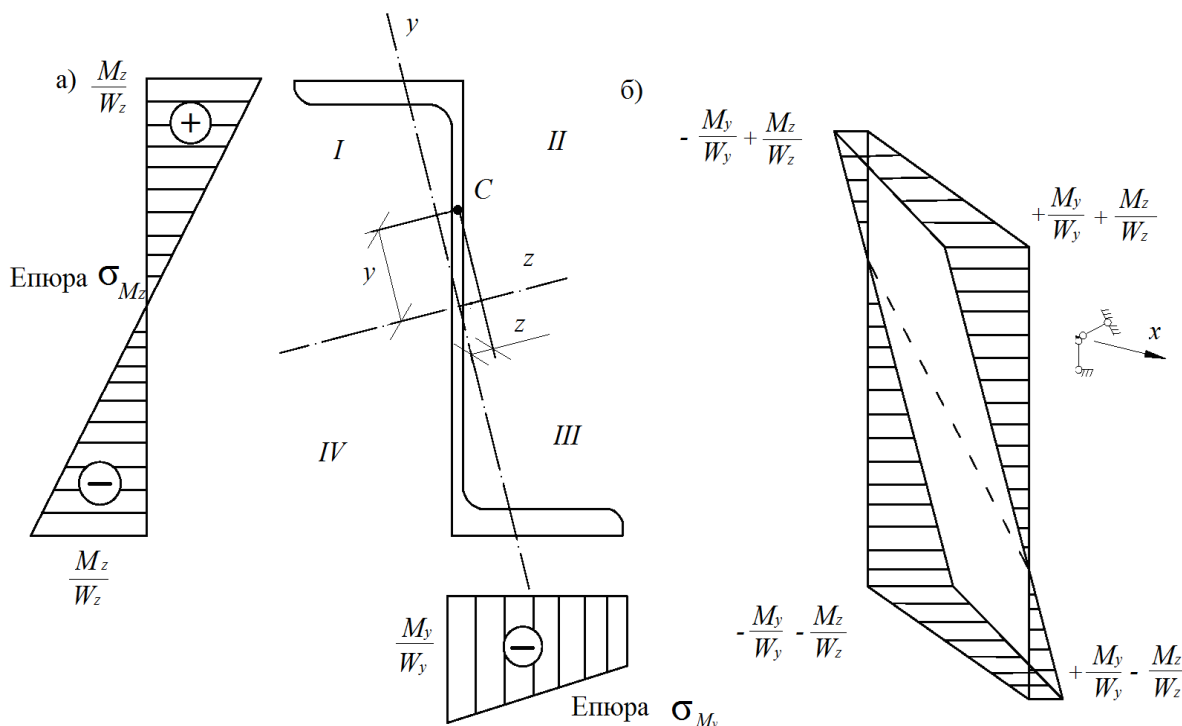


Рис. 6. Нормальні напруження в перерізі перфорованого прогону: а – за дії  $M_z$  і  $M_y$ ; б – за сумісної дії згинальних моментів

Повний згинальний момент  $M$  пов'язаний з його складовими  $M_z$  і  $M_y$  залежностями

$$\begin{cases} M = \sqrt{M_z^2 + M_y^2}; \\ M_z = M \cos \alpha; \\ M_y = M \sin \alpha, \end{cases} \quad (6)$$

де  $\alpha$  – кут між віссю  $y$  і площиною дії повного моменту (рис. 7).

Кут нахилу силової площини до головної осі інерції перерізу

$$\operatorname{tg} \alpha = |M_y / M_z|. \quad (7)$$

Положення площини дії повного моменту встановлюється з урахуванням того, що ця площина проходить через центр ваги перерізу і два квадранти, у яких обидва моменти  $M_z$  і  $M_y$  викликають напруження одного знаку. Нормальні напруження за косоного згину

$$\sigma = \pm M \left( \frac{y \cos \alpha}{I_z} + \frac{z \sin \alpha}{I_y} \right) \quad (8)$$

у центрі ваги поперечного перерізу дорівнюють нулю, у чому можна легко

переконались, підставивши у формулу (8) значення  $y = 0$  і  $z = 0$  (тобто координати центра ваги перерізу). Отже, за косою згину нейтральна вісь проходить через центр ваги поперечного перерізу.

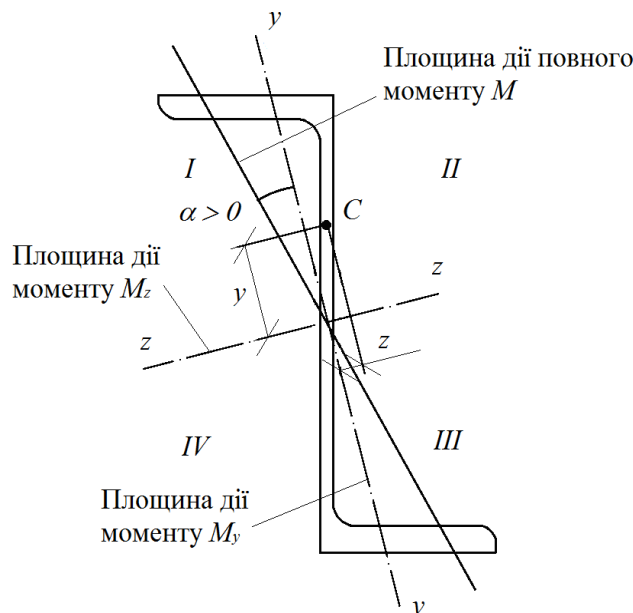


Рис. 7. Кут нахилу площини дії повного моменту  $M$

Для Z-подібного профілю положення головних осей інерції  $y$  і  $z$  не будуть вертикальним і горизонтальним. Вони будуть повернуті на деякий кут, що зумовлено несиметричністю поперечного перерізу конструкції. Наприклад, для Z-подібного перфорованого прогону, виготовленого з вихідного прокатного швелера № 22У/ДСТУ 3436-96, цей кут складатиме  $14^\circ$  (рис. 8) і за кута нахилу конструкції  $0^\circ$  площина дії згинального моменту не буде паралельною головній осі інерції  $y$ , тобто виникатиме косий згин. Причому повне зовнішнє навантаження  $F$  сприйматиметься лише стінкою прогону і у верхньому поясі перфорованого профілю виникатиме крутний момент від дії горизонтальної складової  $F_2$  (див. рис. 5), який спричиняє деформацію конструкції з її площини.

На відміну від прямого згину, за косою згину нейтральна вісь (нульова лінія) не буде перпендикулярною до площини дії згинального моменту, а буде повернута на певний кут від осі, яка перпендикулярна до площини дії згинального моменту, до осі, відносно якої момент інерції має мінімальне значення.

Нормальні напруження в кожній точці поперечного перерізу перфорованого Z-подібного прогону за косою згину, як і у випадку прямого згину, прямо пропорційні відстані від цієї точки до нейтральної осі. Тобто найбільші напруження, які виникають у точках поперечного перерізу, найбільш віддалені від нейтральної осі.

Визначення положення нейтральної осі необхідне для знаходження небезпечних точок перерізу (див. рис. 8) і подальшого розрахунку на міцність.

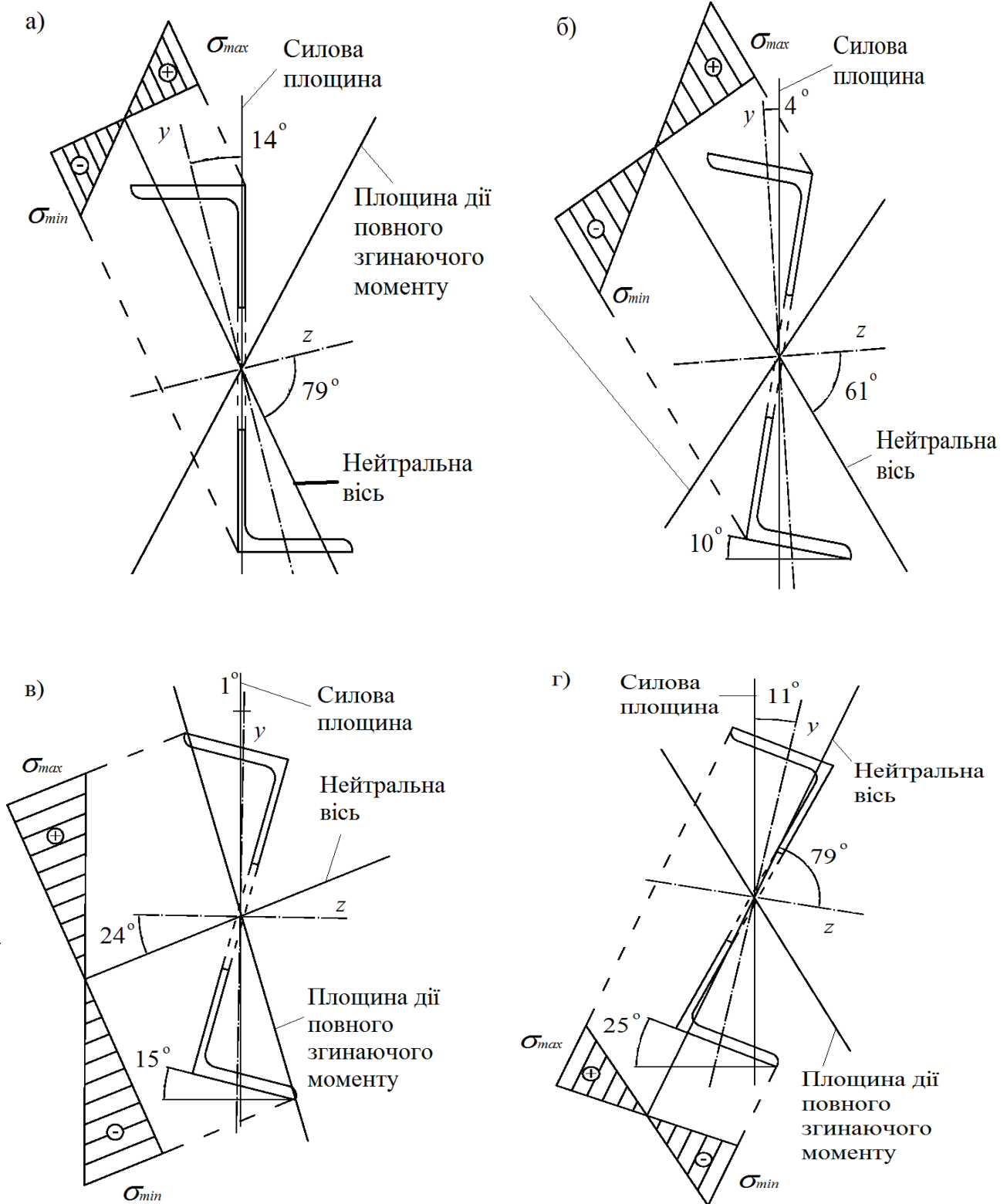


Рис. 8. Небезпечні точки перфорованого елемента для різних кутів нахилу:  
а – 0°; б – 10°; в – 15°; г – 25°

Для розрахунку перфорованих елементів в умовах косого згину пропонується взяти за основу існуючу методику розрахунку згинальних перфорованих елементів

[1, с. 115] і визначати напруження в розрахункових перерізах бісталевого елемента з несиметричними по висоті поясами (рис. 9) на 1-й і 3-й ділянках за формулами:

$$\text{точка 1} \quad \sigma_{sup1} = \frac{M_z h_1}{I_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n; \quad (9)$$

$$\text{точка 2} \quad \sigma_{sup2} = \frac{M_z d_1}{I_z} + \frac{Q_{sup2} a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u \gamma_n}; \quad (10)$$

$$\text{точка 3} \quad \sigma_{inf3} = \frac{M_z h_2}{I_z} + \frac{Q_{inf1} a}{2 W_{inf,max}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n; \quad (11)$$

$$\text{точка 4} \quad \sigma_{inf4} = \frac{M_z d_2}{I_z} + \frac{Q_{inf2} a}{2 W_{inf,min}} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u \gamma_n}, \quad (12)$$

де  $M_z = M \cos \alpha$ ;  $M_y = M \sin \alpha$  – згинальні моменти відповідно в площині та з площини дії зовнішнього навантаження;

$h_1; d_1; h_2; d_2$  – відстані від головних осей інерції до точки, що розглядається;  $I_z$  – момент інерції у відповідному перерізі;

$W_{sup,max}; W_{sup,min}; W_{inf,max}; W_{inf,min}$  – максимальні та мінімальні моменти опорів перерізів верхнього і нижнього поясів;

$R_y, R_u$  – розрахункові опори сталі відповідно за межею текучості і межею міцності;

$\gamma_c, \gamma_u$  – коефіцієнти відповідно умов роботи і надійності;

$Q_{sup1}; Q_{sup2}; Q_{inf1}; Q_{inf2}$  – відповідні поперечні зусилля, які сприймаються тавровими поясами і визначаються пропорційно їх жорсткостям, тобто приймаються коефіцієнти розподілу:

$$\text{для верхнього пояса} \quad \alpha_{sup} = \frac{I_{sup}}{I_{sup} + I_{inf}}; \quad (13)$$

$$\text{для нижнього пояса} \quad \alpha_{inf} = 1 - \alpha_{sup}, \quad (14)$$

де  $I_{sup}; I_{inf}$  – моменти інерції перерізів верхнього і нижнього поясів.

Поперечні сили в поясах

$$\begin{cases} Q_{sup1} = \alpha_{sup} Q_1; & Q_{sup2} = \alpha_{sup} Q_2; \\ Q_{inf1} = \alpha_{inf} Q_1; & Q_{inf2} = \alpha_{inf} Q_2, \end{cases} \quad (15)$$

де  $Q_1; Q_2$  – поперечні зусилля в перерізі.



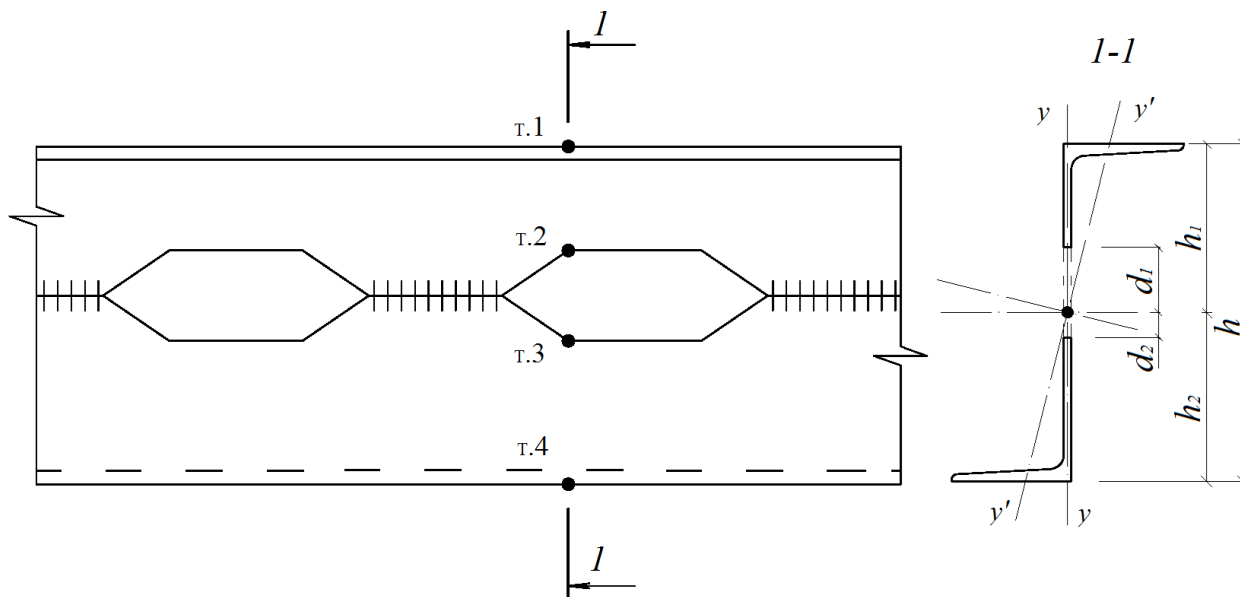


Рис. 9. Схема ділянки прогону з перфорованою стінкою

Для визначення напружень на ділянці 2 використовується формула

$$\sigma = 0,87 \sqrt{\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{zy}^2} \leq R_y \gamma_c, \quad (16)$$

де  $\sigma_z = \frac{M_z h_1}{I_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2 W_{sup,max}}$  – нормальні напруження в серединній площині стінки,

спрямовані паралельно поздовжній осі конструкції;

$\sigma_y = M_y / W_y$  – те саме, спрямовані перпендикулярно до поздовжньої осі конструкції;

$\tau_{zy} = \frac{Q_y S}{I_z t_w}$  – дотичні напруження в точці стінки конструкції, що розглядається.

Розрахунок на міцність розрізних балок 2-го і 3-го класів пропонується виконувати за формулами:

$$\text{точка 1} \quad \sigma_1 = \frac{M_z h_1}{c_x \beta J_z} + \frac{Q_{sup1} a}{2 W_{sup,max}} \pm \frac{M_y}{c_y W_y} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n; \quad (17)$$

$$\text{точка 2} \quad \sigma_2 = \frac{M_z d_1}{c_x \beta J_z} + \frac{Q_{sup2} a}{2 W_{sup,min}} \pm \frac{M_y}{c_y W_y} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n, \quad (18)$$

де  $c_x$ ;  $c_y$ ;  $\beta$  – коефіцієнти, які приймаються за нормами проектування [1].

Окрім теоретичних досліджень для зазначених конструкцій були проведені числові дослідження у програмному комплексі "Ліра", а також комплексні експериментальні дослідження на зразках у натуральну величину, результати яких мають досить точну збіжність, що дає можливість зробити висновок про можливість застосування запропонованих методик і формул для визначення напружено-деформованого стану на практиці.

**Висновки.** Застосування деформаційної схеми для стиснуто-згинального перфорованого елемента дозволяє враховувати додаткові напруження в його перерізах за рахунок деякого збільшення або зменшення згинального моменту. У

результаті цього напруження по висоті перерізу збільшуються або ж зменшуються залежно від того, де знаходиться розрахункова точка перерізу – у розтягнутій чи стиснутій зоні. Для перфорованих елементів, що працюють в умовах косоного згину, запропоновано формули для визначення напружень у характерних точках перерізів елементів з отворами і без них для розрахунку з урахуванням і без урахування пружно-пластичних деформацій. Подальшого дослідження потребують питання втрати місцевої стійкості поясів і стінок перфорованих елементів, оскільки саме через неї відбувається втрата несучої здатності елементів у цілому за різних видів напружено-деформованого стану.

#### *Список використаних джерел*

1. Сталеві конструкції [Текст]: ДБН В.2.6 – 198: 2014. – [офіц вид.]. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2014. – 199 с. (Нормативний документ Мінрегіонбуду України. Норми проектування).
2. Романюк, В. В. Міцність та деформативність перфорованих елементів сталевих арки [Текст] : монографія / В. В. Романюк, В. В. Супрунюк. – Рівне : НУВГП, 2013. – 106 с.
3. Романюк, В. В. Несуча здатність перфорованих прогонів Z-подібного профілю за косоного згину [Текст]: монографія / В. В. Романюк, В. Б. Василенко, В. В. Супрунюк. – Рівне : НУВГП, 2017. – 206 с.

---

Романюк Володимир Володимирович, кандидат технічних наук, професор кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування. Тел.: (096) 804-31-77. E-mail: v.v.romaniuk@nuwm.edu.ua.

Супрунюк Володимир Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільних доріг, основ і фундаментів Національного університету водного господарства та природокористування. Тел.: (097) 732-99-01. E-mail: v.v.supruniuk@nuwm.edu.ua.

Романюк Владимир Владимирович, кандидат технических наук, профессор кафедры промышленного, гражданского строительства и инженерных сооружений Национального университета водного хозяйства и природопользования. Тел.: (096) 804-31-77. E-mail: v.v.romaniuk@nuwm.edu.ua.

Супрунюк Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог, оснований и фундаментов Национального университета водного хозяйства и природопользования. Тел.: (097) 732-99-01. E-mail: v.v.supruniuk@nuwm.edu.ua.

Romaniuk Volodymyr Volodymyrovych, Cand. Tech. Sciences, Professor of the Department of Industrial, Civil Engineering at the National University of Water Management. Tel.: (096) 804-31-77. E-mail: v.v.romaniuk@nuwm.edu.ua.

Supruniuk Volodymyr Volodymyrovych, Cand. Tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Roads, Fundamentals and Foundations of the National University of Water Management. Tel.: (097) 732-99-01. E-mail: v.v.supruniuk@nuwm.edu.ua.

Статтю прийнято 15.02.2018 р.

УДК 691.3:620.197.6

## ГІДРАТАЦІЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ В ПРИСУТНОСТІ ДОБАВКИ ВИСОКОДИСПЕРСНОЇ КРЕЙДИ

Канд. техн. наук О. С. Борзяк, асп. С. М. Чепурна

## ГИДРАТАЦИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА В ПРИСУТСТВИИ ДОБАВКИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО МЕЛА

Канд. техн. наук О. С. Борзяк, асп. С. Н. Чепурная

## HYDRATION OF PORTLAND CEMENT WITH THE ADDITION OF HIGHLY DISPERSED CHALK

PhD techn. O. S. Borziak, pg. S. M. Chepurna

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127256

---

*У роботі досліджено вплив добавки високодисперсної крейди на процеси гідратації портландцементу. Можливість протікання реакцій взаємодії підтверджується термодинамічними розрахунками. Розраховано кількість карбонату кальцію, що використовується для створення представлених сполук з урахуванням мінерального складу цементу, ступеня гідратації клінкерних мінералів, ступеня засвоєння гіпсу.*

**Ключові слова:** високодисперсна крейда, гідрокарбоалюмінат кальцію, портландцемент, термодинамічні розрахунки.

*В работе исследовано влияние добавки высокодисперсного мела на процессы гидратации портландцемента. Возможность протекания реакций взаимодействия подтверждается термодинамическими расчетами. Рассчитано количество карбоната кальция, используемого для создания представленных соединений с учетом минерального состава цемента, степени гидратации клинкерных минералов, степени усвоения гипса.*

**Ключевые слова:** высокодисперсный мел, гидрокарбоалюминат кальция, портландцемент, термодинамические расчеты.

*The effect of the addition of highly disperse chalk on the hydration processes of Portland cement has been studied. The possibility of interaction reactions is confirmed by thermodynamic calculations. Calculated the amount of calcium carbonate used to create the presented compounds, taking into account the mineral composition of cement, the degree of hydration of clinker minerals, the degree of assimilation of gypsum.*

**Key words:** highly dispersed chalk, calcium hydrogen carbonate, Portland cement, thermodynamic calculations.

**Вступ.** Одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасного матеріалознавства є розроблення нових типів цементів і на їх основі бетонів, що забезпечуватимуть високі експлуатаційні та технологічні властивості конструкцій протягом

тривалого періоду. Тому останнім часом велика увага приділяється виробництву нових композиційних в'язучих, які мають поліпшені фізико-механічні характеристики (міцність на стиск і вигин, водонепроникність, хімічна стійкість,

морозостійкість тощо, що збільшують показники довговічності конструкцій будинків і споруд), низьку енергоємність і при виробництві яких вирішуються питання охорони навколишнього середовища.

Використання добавок різного складу дозволяє знизити кількість клінкерного цементу, підвищити щільність структури і, як наслідок, міцність, довговічність і стійкість бетонів в агресивному середовищі. У якості природних добавок досить часто використовують карбонатні породи, проте в Україні використовується практично тільки вапняк-черепашник, а така карбонатна порода, як крейда, взагалі не використовується. Використання крейди ускладнене її основними властивостями: підвищеною липкістю, гідрофільністю, високою питомою поверхнею. Однак досить об'ємні запаси крейди з високим вмістом карбонату кальцію, який здатний брати участь у структуроутворенні цементного композита і бетону, а також слабка цементация частинок з високою питомою поверхнею створюють передумови для використання меленої крейди в якості заповнювачів для бетонних сумішей і бетонів.

**Аналіз досліджень і публікацій.** При введенні до складу бетону карбонатних мікронаповнювачів між цими частинками та продуктами гідратації цементу відбувається взаємодія. Ця взаємодія розглядається різними науковими школами неоднозначно. За роботою [1] карбонатні наповнювачі обумовлюють епітаксіальне зрощення, найбільш інтенсивне в разі наявності хімічної спорідненості як по катіону, так і по аніону. Експериментально встановлено, що міцність на відрив цементного каменю найменша з кварцовими пісками, а найбільша з карбонатними породами. У роботі [2] формування міцної контактної зони пояснюється самоущільненням за рахунок хімічної взаємодії між карбонатним заповнювачем і продуктами гідратації

цементу. Контактна зона – це самостійний елемент структури бетону, який відіграє істотну роль у підвищенні міцності, водонепроникності, морозостійкості, хімічної стійкості бетону. Тому є необхідність розглянути процеси, що відбуваються на контакті мікронаповнювача – високодисперсної крейди – і цементного каменю.

Основу міцності цементного каменю [3] становлять електрогетерогенні контакти, що виникають між кристалами з позитивно зарядженими поверхнями гідроксиду кальцію, гідроалюмінатів, гідроферитів, а також гідросилікатів, що мають негативний поверхневий заряд.

Існують різні способи підвищення вмісту електрогетерогенних контактів у дисперсних системах: перезарядження дисперсних частинок системи за допомогою постійного електричного струму, підвищення тонкості помелу в'язучого з його подальшим перезарядженням, введення в цементно-піщані суміші порошоків з позитивно зарядженими дисперсними частинками [4, 5]. Найбільш доступним з перерахованих способів створення електрогетерогенних контактів у цементно-піщаних сумішах є введення в ці суміші позитивно заряджених мінеральних частинок високого ступеня дисперсності.

Процеси твердіння мінеральних в'язучих у присутності мінеральних добавок обумовлені одночасно і гідрато- і структуроутворенням. Це пов'язано з тим, що темпи твердіння різних фаз клінкерного в'язучого та їх взаємодії з частинками добавок істотно відрізняються.

Крейда – це речовина зі змішаними структурними зв'язками, основна частина якої представлена на 95–98 % карбонатом кальцію і незначною кількістю глинистих домішок.

При гідратації алюмоутворюючих клінкерних мінералів  $C_3A$  і  $C_4AF$  в присутності карбонату кальцію відбувається зміна фазового складу новоутворень, що веде до зміни фізико-

механічних властивостей цементних композитів [6, 7].

Було встановлено, що утворення гідрокарбоалюмінату кальцію на поверхні карбонатних наповнювачів сприяє інтенсифікації процесу твердіння за рахунок алюмомісних клінкерних мінералів, при цьому з поверхнею карбонатних зерен утворюється міцний кристалічний конгломерат з гексагональними кристалами гідрокарбоалюмінату кальцію [2, 8, 9].

У процесі гідратації карбонат кальцію вступає в хімічну взаємодію з алюмоутворюючими клінкерними мінералами  $C_3A$  і  $C_4AF$  з утворенням кубічного гідроалюмінату кальцію  $3CaO \times Al_2O_3 \times 6H_2O$  і комплексної сполуки гідракарбоалюмінату кальцію (ГКАК)  $C_3A \times CaCO_3 \times 11H_2O$  за умови, що крейда представлена зернами  $d < 42$  мкм [8-10]. При більш крупних зернах карбонату кальцію утворюється невелика кількість кубічного  $C_3AH_6$  [11].

Гідрокарбоалюмінати кальцію зростаються між собою і поверхнею карбонату кальцію в щільний кристалічний конгломерат, можуть служити «зародками кристалізації» і гарною епітаксичною підкладкою для утворення нових сполук [12].

За даними різних авторів [8, 9] при гідратації  $C_3S$  і  $C_2S$  в присутності карбонату кальцію утворюється незначна частина скоутиту ( $6CaO \times SiO_2 \times CaCO_3 \times nH_2O$ ).

У присутності карбонату кальцію спостерігається прискорення процесу гідратації клінкерних частинок цементного композита, при цьому збільшується водоцементне відношення в системі та відбувається відведення продуктів розчинення з зони реакції до поверхності частинок крейди [11].

У системі  $C_3A \times CaCO_3 \times 11H_2O$  –  $C_3A \times Ca(OH)_2 \times 11H_2O$ , крім ГКАК [13], виявили утворення неперервного ряду твердих розчинів, а саме стійко ідентифікуються сполуки

$3CaO \times Al_2O_3 \times 0,25CaCO_3 \times 0,75Ca(OH)_2 \times 12H_2O$ , і відзначено можливість утворення  $C_3A \times 3CaCO_3 \times (30 \div 32)H_2O$ .

Моногідракарбоалюмінат і гексагональні гідроалюмінати кальцію виявляються в структурі цементного каменю і бетону, що довгий час тверділи при нормальних умовах. При пропарюванні можливе розкладання моногідракарбоалюмінату кальцію на  $C_3AH_6$  і  $CaCO_3$ . У гелеподібній складовій цементного каменю, що затвердів, можливе утворення фаз досить складного складу, а саме томаситу  $\{Ca_3[Si(OH)_6] \times 12H_2O\} \times (SO_4) \times (CO_3)$  [2].

У контактній зоні карбонату кальцію з гідратними фазами цементного каменю утворюється перехідна зона з дрібних кристалів довільної орієнтації, у межах яких утворюється твердий розчин зі складом, що безперервно змінюється [8, 9, 14].

При замішуванні цементної суміші з карбонатом кальцію молекули води поступово активують поверхневі шари  $CaCO_3$  і сприяють дифузії іонів  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$ ,  $CO_3^{3-}$  в структурі крейди. У результаті цього процесу на пізніх термінах твердіння цементу утворюються ізоморфні зв'язки між  $Ca(OH)_2$  і  $CaCO_3$ , що зміцнює структуроутворюючі зв'язки в системі «цемент – наповнювач – вода» [15].

Підвищену міцність цементного каменю в присутності карбонату кальцію показали зразки не тільки з  $C_3A$ , що пов'язано з утворенням гідрокарбоалюмінату кальцію, але й з  $C_3S$ , що, на думку Е. Р. Пінуса [16], пов'язано з кристалохімічною взаємодією  $CaCO_3$  і  $C_3S$ , а також з утворенням великої кількості зростків кристалів гідратних новоутворень внаслідок їх хімічної спорідненості та близькості параметрів кристалічних решіток. Шари кальцію на поверхні заповнювача ущільнюються і зміцнюються контактні зони в'язучого.

О. Г. Ольгінський у своїх працях [6] зазначав, що зерна карбонату кальцію

мають водовідсмоктувальну спроможність, забирають воду з цементного тіста, у результаті чого цементне тісто ущільнюється на контакті з заповнювачем.

Дані, які отримала З. М. Ларіонова [17], показали, що цементний камінь з карбонатом кальцію разом з кристалічним гідрокарбоалюмінатом кальцію містить значну кількість гелеподібної маси, найбільш щільні накопичення яких спостерігаються навколо остаточних клінкерних зерен, і гідрокарбоферити на контакті з карбонатом кальцію.

Результати аналізу цементних композицій з крейдою, отримані Н. О. Копаніца, Л. А. Анікановою [18], показали повну відсутність портландиту і появу нових сполук гідрокарбонатів кальцію й алюмінію, крім того, тонкодисперсний карбонат кальцію в цементних композиціях виступає в ролі гарної основи для кристалізації сполук.

Дослідження, проведені М. І. Стрелковим, М. С. Золотовим, Т. В. Жидковою [19], свідчать, що цементні композиції, до складу яких входять карбонати лужних металів і карбонату кальцію, утворюють комплексні сполуки – гідрокарбонати, що сприяє підвищенню морозостійкості та сульфатостійкості бетону.

Прискорення процесу гідратації аліту в присутності високодисперсної крейди, на нашу думку, пов'язано з тим, що додаткові центри кристалізації сприяють відведенню

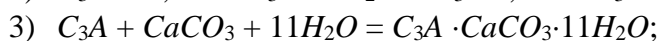
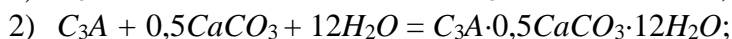
первинних гідратів за межі плівки новоутворень і кристалізації портландиту  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  з перенасиченого розчину на поверхню зерен кальциту. При цьому знижується щільність плівок новоутворень, що веде до збільшення швидкості дифузії води до поверхні зерен аліту і, як наслідок, до підвищення ступеня його гідратації. Крейда вступає у взаємодію з алюмоутворюючими фазами портландцементу клінкеру і має підвищену адсорбційну здатність. У результаті на поверхні зерен кальциту можуть бути присутні сполуки типу гідрокарбоалюмінатів кальцію [2, 6, 7].

**Мета та завдання досліджень.** Мета досліджень – визначення впливу добавки високодисперсної крейди на процеси гідратації портландцементу.

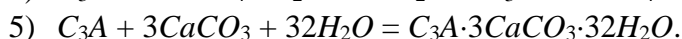
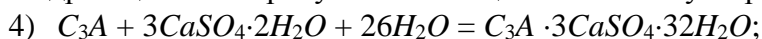
Завдання досліджень – за допомогою термодинамічних розрахунків встановити вірогідність протікання реакцій між мінералами портландцементу і добавкою високодисперсної крейди; розрахувати допустиму кількість добавки високодисперсної крейди, враховуючи мінеральний склад портландцементу.

**Основна частина досліджень.** Імовірні реакції в системі клінкерні мінерали – карбонатні мінеральні добавки, продуктами яких можуть бути кристалічні фази, які збільшують сумарний об'єм твердої фази за рахунок хімічного зв'язування значної кількості води, і характеризуються знаком «+» поверхневого заряду [3]:

- гідратації  $C_3A$  в присутності кальцієвих солей з утворенням  $AFm$ -фаз:



- гідратації  $C_3A$  в присутності кальцієвих солей з утворенням  $AFt$ -фаз:



Можливість протікання наведених хімічних реакцій визначається величиною їх вільної енергії Гіббса.

Вільна енергія Гіббса реакцій вигляду  $aA + bB = cC + dD$ , де  $A, B, C, D$  – речовини, що беруть участь у реакції (іони),  $a, b, c, d$  –

їхні стехіометричні коефіцієнти, за роботою [14], дорівнює

$$\Delta G = c\Delta G_C + d\Delta G_D - (a\Delta G_A + b\Delta G_B), \quad (1)$$

де  $\Delta G_A, \Delta G_B, \Delta G_C, \Delta G_D$  – вільна енергія Гіббса утворення речовин (іонів)  $A, B, C, D$  з елементів.

Вільна енергія Гіббса наведених реакцій складає:

- 1)  $\Delta G = -7778,5 - (-3382,3) - (-1797,8) - 10 \times (-237,2) = -226,4$  кДж/моль;
- 2)  $\Delta G = -7336 - (-3382,3) - 0,5 \times (-1129,2) - 12 \times (-237,2) = -542,7$  кДж/моль;
- 3)  $\Delta G = -7337,5 - (-3382,3) - (-1129,2) - 11 \times (-237,2) = -216,8$  кДж/моль;
- 4)  $\Delta G = -15205,9 - (-3382,3) - 3 \times (-1798,7) - 26 \times (-237,2) = -260,3$  кДж/моль;
- 5)  $\Delta G = -14567,7 - (-3382,3) - 3 \times (-1129,2) - 32 \times (-237,2) = -206,44$  кДж/моль.

Вільна енергія Гіббса утворення речовин, що беруть участь у гідратації портландцементу з карбонатними добавками із елементів, прийнята за роботами [20, 21].

Оскільки в цементі міститься гіпс, карбонатвмісна добавка не вступає в реакцію з  $C_3A$  і  $C_4AF$  до тих пір, поки гіпс не зв'яжеться у важкорозчинний гідросульфатоалюмінат кальцію. Реакція можлива, якщо після утворення гідросульфатоалюмінату кальцію залишаються  $C_3A$  і  $C_4AF$ , що не прореагували з сульфат-іонами.

Для визначення кількості карбонату кальцію, що використовується для створення представлених сполук, можна використати формулу, що запропонована у роботі [19].

При проведенні розрахунків були прийняті такі умовні літерні позначення:

$x$  – ступінь гідратації клінкерних мінералів ( $x_1$  -  $C_3A$ ,  $x_2$  -  $C_4AF$ ,  $x_3$  -  $C_3S$ ,  $x_4$  -  $C_2S$ ) до розрахункового терміну твердіння;

$x_5$  – ступінь засвоєння гіпсу;

$z$  – співвідношення молярної маси компонентів;

$y$  – коефіцієнт, що враховує зниження кількості кристалічної фази, що представлена трьома сполуками ( $y_1$  -  $3CaO \times Al_2O_3$ ,  $y_2$  -  $3CaO \times Fe_2O_3$ ;  $y_3$  -  $Ca(OH)_2$ );

$k$  – мінералогічний склад цементу.

$$z_1 = \frac{CaCO_3}{3CaO \times Al_2O_3} = 0,37; \quad (2)$$

$$z_2 = \frac{CaCO_3}{3CaO \times Fe_2O_3} = 0,30; \quad (3)$$

$$z_3 = \frac{CaCO_3}{Ca(OH)_2} = 1,35; \quad (4)$$

$$z_4 = \frac{3CaO \times Al_2O_3}{CaSO_4 \times H_2O} = 1,57; \quad (5)$$

$$z_5 = \frac{3CaO \times Fe_2O_3}{3CaO \times Al_2O_3 \times Fe_2O_3} = 0,76; \quad (6)$$

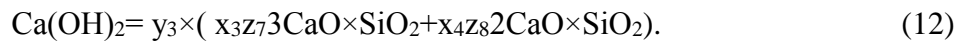
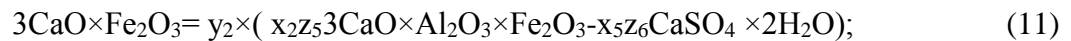
$$z_6 = \frac{3CaO \times Al_2O_3}{CaSO_4 \times H_2O} = 1,91; \quad (7)$$

$$z_7 = \frac{Ca(OH)_2}{3CaO \times SiO_2} = 0,32; \quad (8)$$

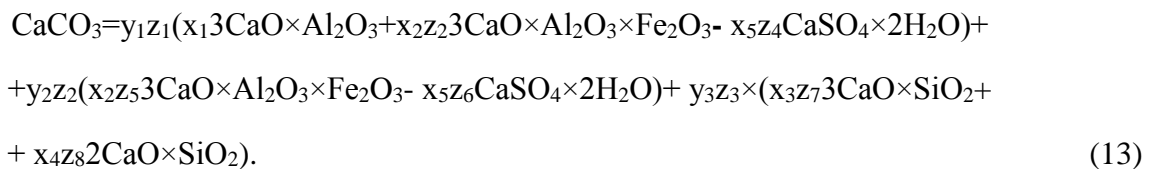
$$z_8 = \frac{Ca(OH)_2}{2CaO \times SiO_2} = 0,43. \quad (9)$$

Кількість компонентів клінкеру, що здатні зв'язувати карбонат кальцію, розраховують так:

$$3CaO \times Al_2O_3 = y_1 \times (x_1 z_1 3CaO \times Al_2O_3 + x_2 z_2 3CaO \times Al_2O_3 \times Fe_2O_3 - x_5 z_4 CaSO_4 \times 2H_2O); \quad (10)$$



Відсоток карбонату кальцію у складі цементного каменю становить



Коефіцієнти  $y_1$  і  $y_2$ ,  $x_5$  дорівнюють 1,  $y_3=0,3$ , тому що високодисперсна крейда має розмір зерен менше 10 мкм, коефіцієнт  $z$  – величина постійна. Ступінь гідратації у

віці 28 діб становить  $x_1=0,84$ ;  $x_2=0,74$ ;  $x_3=0,69$ ;  $x_4=0,11$ .

Підставивши значення у формулу (13), отримуємо:

- для ПЦ І-400

$$\begin{aligned} \text{CaCO}_3 = & 1 \times 0,37(0,84 \times 6,2 + 0,74 \times 0,3 \times 13,8 - 1 \times 1,57 \times 0,3) + 1 \times 0,3(0,74 \times 0,76 \times 13,8 - \\ & - 1 \times 1,91 \times 0,3) + 0,3 \times 1,35(0,69 \times 0,32 \times 60,7 + 0,11 \times 0,48 \times 16,5) = 15,8; \end{aligned} \quad (14)$$

- для ПЦ І-500 Н

$$\begin{aligned} \text{CaCO}_3 = & 1 \times 0,37(0,84 \times 6,0 + 0,74 \times 0,3 \times 12,5 - 1 \times 1,57 \times 0,3) + 1 \times 0,3(0,74 \times 0,76 \times 12,5 - \\ & - 1 \times 1,91 \times 0,3) + 0,3 \times 1,35(0,69 \times 0,32 \times 63,7 + 0,11 \times 0,48 \times 14,8) = 10,7. \end{aligned} \quad (15)$$

Процес взаємодії карбонату кальцію з продуктами гідратації відбувається на поверхні зерен кальциту, тому кількість добавки карбонату кальцію в структурі бетону має бути більше, ніж розрахункова кількість. При цьому кількість новоутворень у цементному камені збільшується на величину, що відповідає кількості зв'язаного карбонату кальцію.

**Висновки.** За теоретичними передумовами, при гідратації алюмомісних клінкерних мінералів  $\text{C}_3\text{A}$  і  $\text{C}_4\text{AF}$  в присутності карбонату кальцію відбувається зміна фазового складу новоутворень, які представлені гідроалюмінатом кальцію  $3\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$  і комплексною сполукою гідрокрбоалюмінату кальцію (ГКАК)  $\text{C}_3\text{A} \times \text{CaCO}_3 \times 11\text{H}_2\text{O}$ .

У результаті аналізу хімічних реакцій і величин їх вільної енергії Гіббса  $\Delta G$  встановлено: у присутності мінеральних добавок можливі всі реакції гідратації трикальцієвого алюмінату  $\text{C}_3\text{A}$  з утворенням кристалогідратів гідросульфо-, гідрокрбоалюмінатів кальцію –  $\text{AFm}$  та  $\text{AFt}$ -фаз; величина вільної енергії Гіббса  $\Delta G$  реакцій припадає на 1 моль  $\text{C}_3\text{A}$ , її величина для однакових умов характеризує перевагу наведених реакцій; реакції взаємодії  $\text{C}_3\text{A}$  з карбонатом кальцію з утворенням  $\text{AFm}$  та  $\text{AFt}$ -фаз за наявності реагуючих компонентів є термодинамічно незворотними.

Оскільки в цементі міститься гіпс, карбонатмісна добавка не вступає в реакцію з  $\text{C}_3\text{A}$  і  $\text{C}_4\text{AF}$  до тих пір, поки гіпс не зв'яжеться у важкорозчинний гідросульфоалюмінат кальцію. Розраховано



кількість карбонату кальцію, що використовується для створення представлених сполук з урахуванням мінерального складу цементу, ступеня

гідратації клінкерних мінералів, ступеня засвоєння гіпсу. Для ПЦ І-400 кількість карбонатних домішок становить 15,8 %, для ПЦ І-500 Н – 10,7 %.

### Список використаних джерел

1. Вознесенский, В. А. Оптимизация состава многокомпонентных добавок в композиты [Текст] / В. А. Вознесенский. – К. : Знание, 1981. – 201 с.
2. Тимашев, В. В. Свойства цемента с карбонатными добавками [Текст] / В. В. Тимашев, В. М. Колбасов // Цемент. – 1981. – № 10. – С. 10–12.
3. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них [Текст] : монография в 3-х т. / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, Л. В. Трикоз [и др.]; под ред. А. Н. Плугина. – К. : Наукова думка, 2012. – Т. 1. – 336 с. Т. 2. – 223. Т. 3. – 287 с.
4. Коллоидно-химические аспекты повышения активности цемента для получения ячеистых и плотных бетонов и растворов без тепловой обработки [Текст] / В. И. Бабушкин, Е. В. Кондращенко, Т. А. Костюк, В. И. Момот // Цемент Украины. – 1997. – № 2. – С. 25–30.
5. Гидратация цемента, активированного током высокого напряжения [Текст] / В. И. Бабушкин, В. А. Матвиенко [и др.] // Известия вузов. Сер. Строительство. – 1993. – № 2. – С. 47–50.
6. Ольгинский, А. Г. Особенности контактообразования в цементных бетонах с минеральными микронаполнителями [Текст] / А. Г. Ольгинский // Вісник ДонДАБА. – 2004. – Вип. 1 (43), Т. 1. – С. 134–140.
7. Мирюк, О. А. Гидратообразование алюминатного цемента долгосрочного твердения [Текст] / О. А. Мирюк // Бетон и железобетон в Украине. – 2011. – № 4 (62). – С. 8–11.
8. Будников, П. П. К вопросу о роли высокодисперсных карбонатных добавок в формировании структуры и состава новообразований, возникающих в гидратирующем цементном камне [Текст] / П. П. Будников, В. М. Колбасов // Труды VI совещания по экспериментальной и технической минералогии и петрографии АН СССР. – 1962. – С. 189–196.
9. Бенштейн, Ю. И. Кристаллизация гидратных новообразований цементного камня на карбонатной подложке [Текст] / Ю. И. Бенштейн // Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева. – М. : МГУ, 1974. – Вып. 68. – С. 16–22.
10. Самченко, С. В. Карбонизация гидратных составляющих портландцемента, алюминатного и сульфоалюминатного цементов [Текст] / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Техника и технология силикатов. – 2013. – № 3. – С. 27–29.
11. Matschei T. The Role of Calcium Carbonate in Cement Hydration [Text] / T. Matschei, B. Lothenbach and F. P. Glasser // Elsevier Magazine: Cement and Concrete Research. – 2007. – Vol. 7. – No. 4. – P. 551–558.
12. Effectiveness of using CO<sub>2</sub> pressure to enhance the carbonation of Portland cement-fly ash-MgO mortars [Text] / [Liwu Mo, Feng Zhang, Min Deng, Daman K. Panesar] // Cement and Concrete Composites. – 2016. – Vol. 70. – P. 78–85.
13. Тимашев, В. В. Цементы с микронаполнителями [Текст] / В. В. Тимашев // Технология вяжущих веществ. – М. : Высшая школа, 1965. – 596 с.
14. Бабушкин, В. И. Термодинамика силикатов [Текст] / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мчедлов-Петросян; под ред. О. П. Мчедлова-Петросяна. – М. : Стройиздат, 1986. – 108 с.

15. Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures [Text] / [Papayianni I, Tsohos G, Oikonomou N, Mavria P.] // Cement and Concrete Composites. – 2005. – Vol. 27. – № 2. – P. 217–222.

16. Любимова, Т. Ю. О свойствах контактной зоны на границе между вяжущим и заполнителем в бетоне [Текст] / Т. Ю. Любимова, Э. Р. Пинус // Тр. НИИЖБ. – М. : Госстройиздат, 1962. – Вып. 28. – С. 196–211.

17. Ларионова, З. М. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона [Текст] / З. М. Ларионова, Л. В. Никитина, В. Р. Гарашин. – М. : Стройиздат, 1977. – 264 с.

18. Копаница, Н. О. Тонкодисперсные добавки для наполненных вяжущих на основе цемента [Текст] / Н. О. Копаница, Л. А. Аниканова, М. С. Макаревич // Строительные материалы. – 2002. – № 9. – С. 2–3.

19. Стрелков, М. И. Снижение расхода цемента в бетоне за счет применения карбонатных добавок [Текст] / М. И. Стрелков, М. С. Золотов, Т. В. Жидкова // Физико-химические проблемы материаловедения и новые технологии. Технология бетона и железобетона. – Белгород, 1991. – С. 42–43.

20. Matschei T. Thermodynamic properties of Portland cement hydrates in the system  $CaO-Al_2O_3-SiO_2-CaSO_4-CaCO_3-H_2O$  [Text] / T. Matschei, B. Lothenbach, F.P. Glasser // Cement and Concrete Research. – 2007. – № 37. – P. 1379-1410.

21. Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems [Text] / [M. Balonis, B. Lothenbach, G. Le Saout, F.P. Glasser] // Cement and Concrete Research. – 2010. – № 40(7). – P. 1009-1022.

---

Борзяк Ольга Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. +380577301063. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Чепурна Світлана Миколаївна, аспірант, асистент кафедри міського будівництва Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел. +380936718436. E-mail: s.chepurna0274@gmail.com.

Borziak Olga S., PhD, associate professor Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Ph. +38057)7301063. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Chepurna Svitlana M., graduate student, assistant of the Department of Urban Development. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Ph. +380936718436. E-mail: s.chepurna0274@gmail.com.

Статтю прийнято 15.02.2018 р.

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

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

*Випуск 175*

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

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

Відповідальний за випуск Ляник Л. В.

Редактор Ібрагімова Н. В.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 27.02.2018 р.  
Формат паперу А4. Папір писальний.  
Умовн.друк. арк. 10,25. Тираж 105. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.