



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 178

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.

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 № 5 від 29 травня 2018 р.

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

Редакційна колегія

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

Залізничний транспорт (273)

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

Транспортні технології (275)

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

Будівництво та цивільна інженерія (192)

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

Механічна інженерія (131, 132, 133)

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

Теплоенергетика (144)

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

ЗМІСТ

Залізничний транспорт (273)

- Павшенко А. В., Бобрицький С. В., Громов В. І.* Модульно-декомпозиційний опис конструкції залізничних тягових приводів 7

Транспортні технології (275)

- Новиков В. В., Панченко С. В., Скорик А. А.* Исследование условий распора колеи со скреплениями типа КБ и его влияния на определение опасной ширины рельсовой колеи 14
- Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гладка А. В.* Покращення електромагнітної сумісності тягового електропривода змінного струму шляхом застосування 4QS-випрямлячів 21
- Продащук С. М., Шаповал Г. В., Тоцька О. В., Марченко О. В., Белан Д. О.* Впровадження інноваційних технологій у пасажирських перевезеннях 28
- Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А.* Застосування класичної моделі Лотки-Вольтерри при розв'язанні задач раціонального використання ресурсів у залізничній сфері діяльності 41
- Запара В. М., Запара Я. В., Ільєнко В. В., Семенюк Є. О., Червяков В. В.* Модель формування системи залізничного швидкісного руху у великих містах на основі визначення попиту на перевезення 49

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Бойко В. Д., Молчанов В. М., Сорока О. О.* Встановлення нормативів строків служби стрілочних переводів для умов експлуатації київського метрополітену 59
- Даренський О. М., Вітольберг В. Г., Потапов Д. О., Сторчай П. Т., Дудіков Д. М.* Особливості взаємодії колії та рухомого складу за наявності початкових нерівностей на поверхні кочення рейок 68
- Резник П. А., Коренев Р. В.* Особенности деформирования сооружений оболочечного типа в условиях динамического нагружения 78
- Деревянко В. Н., Гришко А. Н., Мороз В. Ю.* Влияние нанодобавок на гидратацию гипсовых вяжущих 88
- Довженко О. О., Погрібний В. В., Чумак Є. І.* Вплив профілю шпонок та ширини шва на несучу здатність з'єднань залізобетонних конструкцій у транспортному будівництві 97
- Острыжнюк М. В., Савченко С. В., Гедулян С. И., Антонюк Н. Р.* Моделирование и анализ реологических показателей самоуплотняющихся легких бетонных смесей с целью повышения их технологичности 107

- Данченко Ю. М., Обіженко Т. М., Качоманова М. П., Тесленко М. Г.* Вплив кислотно-основних властивостей оксидних наповнювачів на вільну поверхневу енергію епоксиполімерних матеріалів 115
- Семко О. В., Магас Н. М., Сіробаба В. О.* Міцність та деформативність сталобетонних конструкцій складеного прямокутного перерізу на легких бетонах 123
- Вайнберг А. И.* Методика расчетов сборной железобетонной обделки напорного гидротехнического туннеля 131

Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Воронін С. В., Скорик О. О., Сафонюк І. Ю., Росляков О. В.* Вплив концентрації дрібнодисперсної води на механізм корозійно-механічного зношування гідравлічних агрегатів транспортних засобів 147

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 621.81

МОДУЛЬНО-ДЕКОМПОЗИЦІЙНИЙ ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТЯГОВИХ ПРИВОДІВ

Кандидати техн. наук А. В. Павшенко, С. В. Бобрицький, асп. В. І. Громов

МОДУЛЬНО-ДЕКОМПОЗИЦИОННОЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЯГОВЫХ ПРИВОДОВ

Кандидаты техн. наук А. В. Павшенко, С. В. Бобрицкий, асп. В. И. Громов

MODULE-DECOMPOSITION DESCRIPTION OF THE CONSTRUCTION OF RAILWAY TRACTIONDRIVERS

Phd. tehn. A. Pavshenko, S. Bobritskiy sciences, pg. V. Gromov

Проведено аналіз несправностей основних модулів конструкції тягового та моторвагонного рухомого складу. Обґрунтовано актуальність проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, спрямованих на удосконалення конструкції існуючих тягових приводів з метою підвищення їх надійності. Досліджено існуючі підходи до класифікації тягових приводів. Подано новий модульно-декомпозиційний опис конструкції тягових приводів, який дає змогу розглядати окремі конструктивні елементи, що входять до складу основних модулів. Наведено приклад застосування запропонованого опису при аналізі несправностей елементів тягового привода моторвагонного рухомого складу.

Ключові слова: тяговий привод, модульно-декомпозиційна схема, конструкційні елементи.

Проведен анализ неисправностей основных модулей конструкции тягового и моторвагонного подвижного состава. Обоснована актуальность проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на усовершенствование конструкций существующих тяговых приводов с целью повышения их надежности. Исследованы существующие подходы к классификации тяговых приводов. Представлено новое модульно-декомпозиционное описание конструкции тяговых приводов, которое позволяет рассматривать отдельные конструкционные элементы, которые входят в состав основных модулей. Приведен пример использования предложенного описания при анализе неисправностей элементов тягового привода моторвагонного подвижного состава.

Ключевые слова: тяговий привод, модульно-декомпозиційна схема, конструкційні елементи.

The analysis malfunctions of the main modules of the traction and motor-vehicle rolling stock components operated in the regional branch of "Southern Railway" PJSC "Ukrainian Railway" has been confirmed. It is noted that the traction drive accounts for almost a third of all malfunctions of

rolling stock. The urgency of research and development works aimed at improving the designs of existing traction drives is grounded in order to increase their reliability. The existing approaches to the classification of traction drives are described. The mentioned disadvantages of the classification, taking into account only the degree of subgrade of the traction electric motor and gearbox. An approach to the modular description of the design of a modern traction drive is considered. Using the principles of hierarchy and blocking (decomposition), a new modular-decomposition description of traction drives is proposed. At the same time, five hierarchical levels with a certain amount of decomposition elements were allocated on each of them. At the first level, the description of the design is the most generalized. In turn, the decomposition elements of the fifth level are the constituents of the design of the main modules, which are accepted by the base ones. This description allows to consider separate structural elements included in the main modules (for example, for the module of traction gear transmission the basic elements adopted the upper and lower gear casing, mounting elements, gear, gear shaft, gear, sealing elements). Of particular importance is the use of the proposed approach in solving complex scientific and technical problems associated with increasing the reliability of the functioning of traction drives. An example of the application of the proposed description in the analysis of faults of elements of the traction tooth gear unit of the traction drive of the motor wagon rolling stock of the EP series is given.

Keywords: traction drive, modularly-decomposition scheme, structural elements.

Вступ. Відповідно до державної програми оновлення рухомого складу на 2017–2021 роки (затверджено на засіданні ПАТ «Укрзалізниця» від 29.11.16 р.) одним із шляхів збереження конкурентоспроможності залізниць є підвищення експлуатаційної надійності існуючого тягового рухомого складу (ТРС) та моторвагонного рухомого складу (МВРС). Водночас ТРС та МВРС, що використовуються на залізницях України, експлуатуються у наднормативний термін.

Це визначає необхідність розгортання комплексу робіт щодо забезпечення надійності та довговічності основних модулів конструкції ТРС та МВРС, у тому числі і тягового привода (ТП).

За результатами досліджень, які проводилися за період з 2015 по 2017 роки встановлено, що для тепловозів серії 2ТЕ116, які експлуатуються в регіональній філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця», на частку ТП припадає близько 30 % від усіх пошкоджень локомотивів. Для електровозів серій ЧС 2, ЧС 7 ця частка складає близько 30 % а для електропоїздів серій ЕР 2, ЕР 2р, ЕР 2т до 24 %. Це підтверджує доцільність проведення науково-дослідних та дослідно-

конструкторських робіт, спрямованих на удосконалення конструкції і підвищення надійності ТП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науково-технічних джерелах висвітлені тільки загальні підходи до опису конструкції ТП сучасного ТРС та МВРС [1–5]. Так, відповідно до найбільш поширеної класифікації, яка враховує ступінь підресореності ТЕД та ТЗП, передбачається поділ конструкції ТП на три класи [1]:

– клас I – з опорно-осьовим розташуванням ТЕД та зубчастих редукторів;

– клас II – з розташуванням ТЕД на підресореній частині ТРС (рамі візка або кузова) та опорно-осьовим розташуванням редуктора;

– клас III – з розташуванням як ТЕД, так і редуктора на підресореній частині ТРС.

Такий опис конструкції не містить інформації про всі елементи ТП та організацію зв'язків між ними.

На висвітлення цих питань спрямована модульна класифікація, у якій ТП описується у вигляді чотирьох основних модулів конструкції – модуль Т, модуль П, модуль З та модуль Д [6]. До складу модуля Т входить тяговий двигун з

конструкційними елементами його закріплення на рамі колісної пари, візка або кузова ТРС. Модуль $П$ поєднує передавальні механізми між електродвигуном та вхідним валом ТЗП. Модуль $З$ складається з шестірні, зубчастого колеса та корпусу редуктора з елементами його закріплення. До модуля $Д$ належать механізми передачі обертального руху від вихідного вала ТЗП на колісну пару.

Разом з тим така класифікація не містить особливостей конструкції розглядених модулів, що ускладнює проведення аналізу досконалості конструкції і можливих пошкоджень окремих елементів, забезпечення надійності ТП у цілому.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є висвітлення модульно-декомпозиційного опису конструкції ТП, у якому розглядаються не тільки його основні модулі, а ще й окремі декомпозиційні елементи, які входять до їх складу. До переліку завдань дослідження належать: аналіз особливостей конструкції механічних систем ТП ТРС та МВРС, розроблення модульно-декомпозиційної класифікації конструкції ТП.

Основна частина досліджень. В основу розроблення такого опису закладено принципи ієрархічності та блочності (декомпозиції) [7–8]. Їх використання дало змогу, залежно від ступеня детальності опису конструкції ТП, виділити відповідні ієрархічні рівні з певною кількістю декомпозиційних елементів на кожному з них. Модульно-декомпозиційний опис конструкцій ТП сучасних ТРС та МВРС (з виділенням п'яти ієрархічних рівнів) подано у вигляді схеми на рис. 1.

Опис конструкції на рівні 1 є найбільш узагальненим. Декомпозиційні елементи $K1$, $K2$, $K3$ характеризують проектно-компонувальні рішення відповідно до I, II та III класів ТП (особливості закріплення та ступінь підресореності ТЕД та ТЗП).

Декомпозиційними елементами рівня 2 є розглянуті вище основні модулі

конструкції – модуль T , модуль $П$, модуль $З$ та модуль $Д$.

Декомпозиційними елементами 3-го рівня є можливі варіанти конструкції виділених на другому рівні модулів, які використовуються в конструкції ТП ТРС і МВРС. Так, елементи T_1 і T_2 – варіанти вибору електродвигуна, що використовується в приводі (постійного або змінного струму). $П_1$ та $П_2$ – варіанти з'єднання вала ТЕД із вхідним валом ТЗП. Елементи $З_1 \dots З_n$ – загальної будови редуктора ТЗП. Елементи $Д_1 \dots Д_k$ – варіанти передачі обертання від ТЗП на вісь колісної пари.

Четвертий рівень містить декомпозиційні складові конструкції стосовно елементів рівня 3. Наприклад, на рівні 3 обрано варіант $П_1$ який відповідає з'єднанню ТЕД та ТЗП із використанням муфти. Тоді відповідні декомпозиційні елементи $П_{11}$ – це гумокордова муфта, $П_{12}$ – муфта з двома шарнірами Гука, $П_{13}$ – врівноважена шарнірно-поводкова муфта, $П_{1j}$ – нові за конструкцією муфти (резерв).

Декомпозиційними елементами 5-го рівня є складові конструкції обраного на рівні 4 технічного рішення. Вони приймаються базовими елементами. Наприклад, для обраного на четвертому рівні елемента $П_{12}$ – муфти з двома шарнірами Гука, отримуємо такі складові: $П_{121}$ – ведуча напівмуфта, $П_{122}$ – ведена напівмуфта, $П_{123}$ – торсіон (гнучкий вал), $П_{124}$ – проміжні деталі.

Для конкретизації елементів конструкції на різних ієрархічних рівнях на рис. 2 подано елементи 3-, 4- та 5-го рівнів модуля тягової зубчастої передачі (модуль 3).

Особливого значення набуває використання запропонованого підходу при вирішенні складних науково-технічних задач, пов'язаних з підвищенням надійності функціонування існуючих ТП. Це підтверджується результатами його використання і проведених в Українському державному університеті залізничного транспорту досліджень з аналізу пошкоджень, які виникають у різних модулях конструкції ТП сучасного ТРС та МВРС.

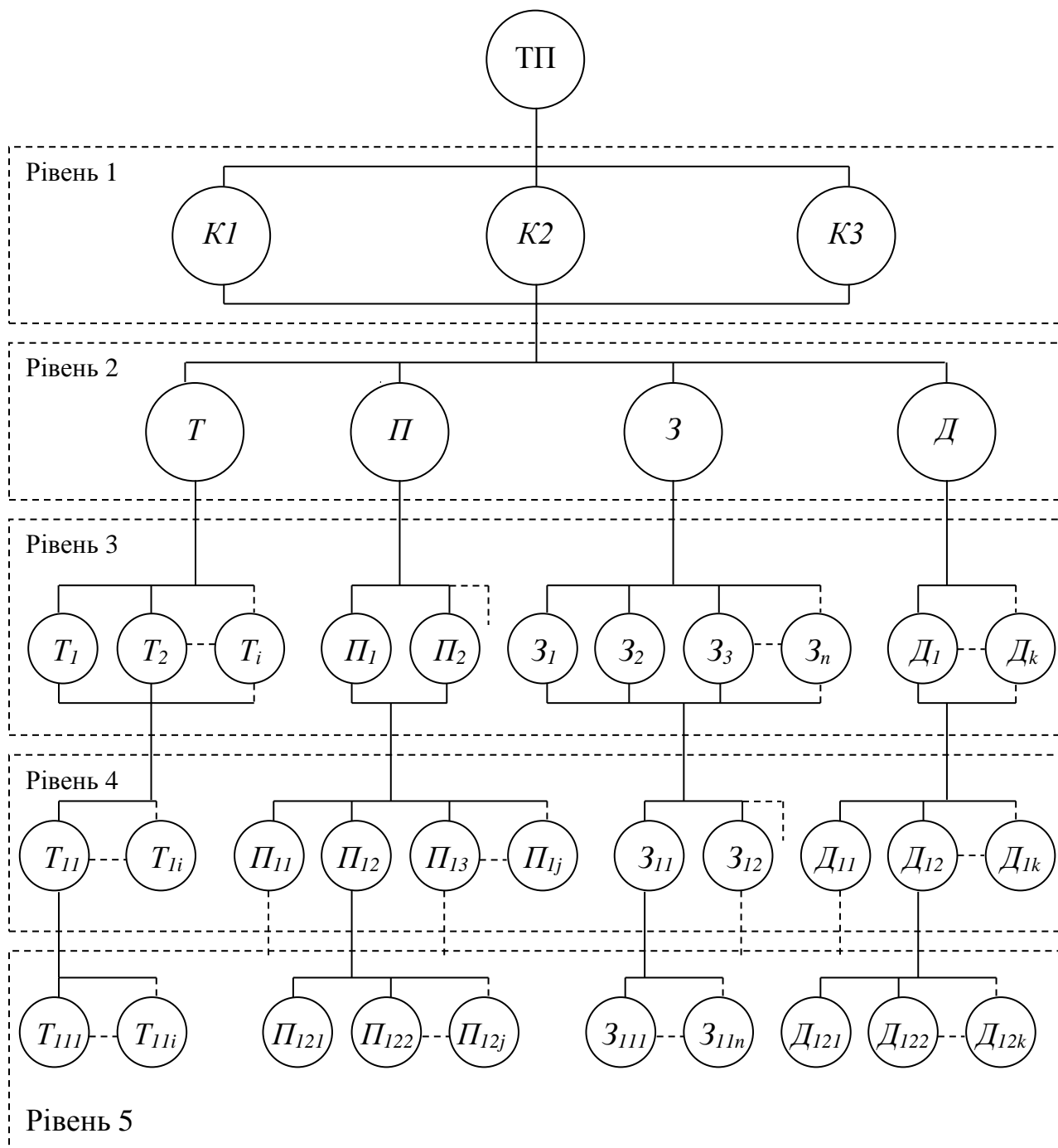


Рис. 1. Модульно-декомпозиційна схема сучасного тягового привода

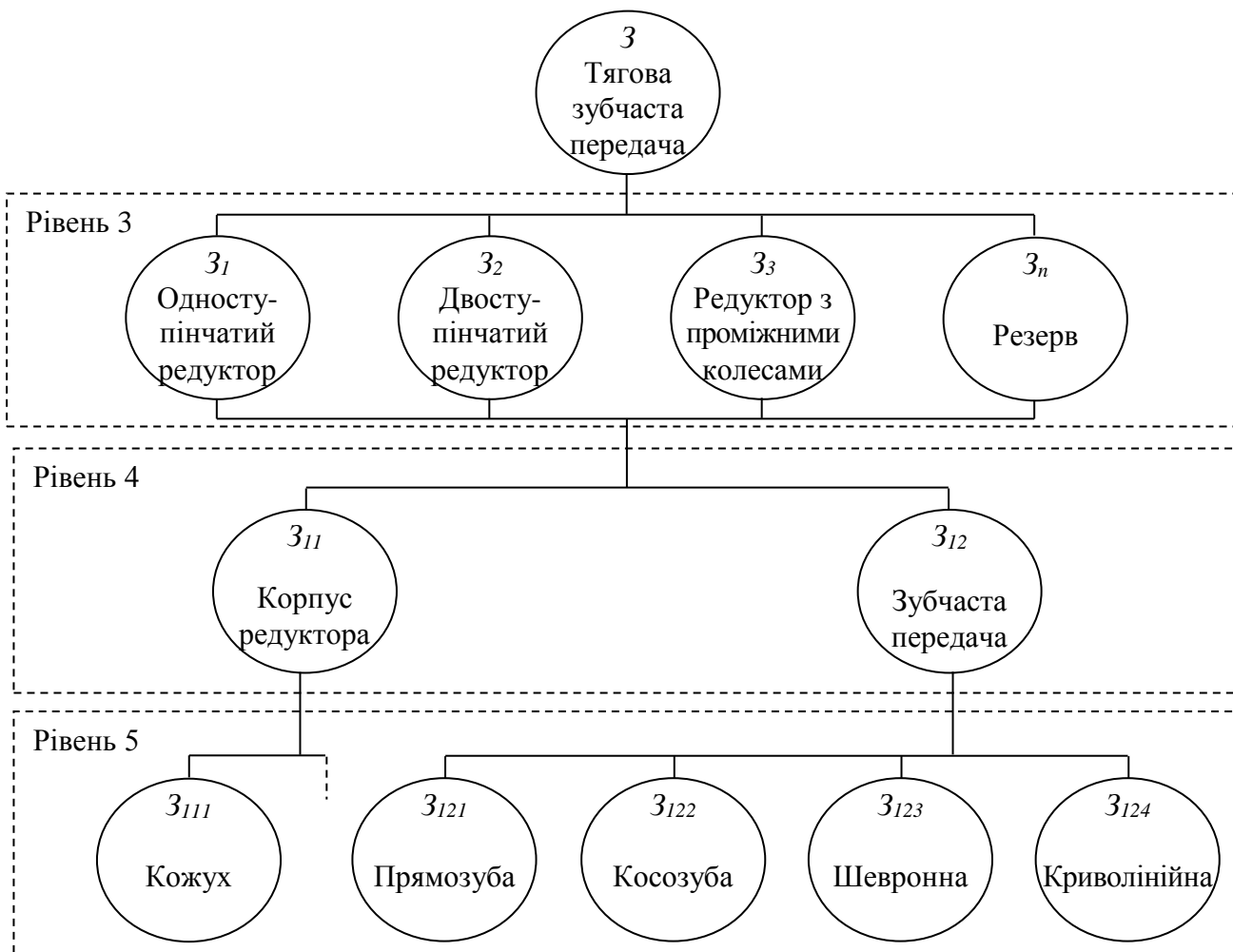


Рис. 2. Декомпозиційний склад модуля зубчастої передачі

Як приклад, нижче, наведені результати дослідження ТП електропоїздів серії EP [9]. Його конструктивну схему подано на рис. 3. Відповідно до запропонованої схеми (рис. 2) такий привод описується такими елементами. Розташування ТЕД та редуктора відповідає класу II – елемент K2 (рівень 1). Основними модулями конструкції є ТЕД – T, перший модуль з’єднання – П, ТЗП (редуктор) – З, другий модуль з’єднання – Д (рівень 2). ТЕД постійного струму T₁, з’єднання вала ТЕД із входним валом редуктора здійснюється через муфту П₁, використовується одноступінчатий редуктор З₁, зубчасте колесо жорстко закріплено на осі колісної пари Д₂

(рівень 3). Основні елементи конструкції ТЕД, гумокордова муфта П₁₁; елементами редуктора є корпус З₁₁ та зубчаста передача З₁₂ (рівень 4). Базові елементи ТЕД, базові елементи муфти П₁₁₁ – П₁₁₄, верхній та нижній кожухи З₁₁₁, елементи кріплення З₁₁₂, прямозубі шестерні і колеса З₁₂₁ (рівень 5).

Подана модульно-декомпозиційна схема також дає змогу описати варіанти окремих конструкційних модулів або ТП у цілому у вигляді відповідних структурних формул. Наприклад, конструкція модуля тягової зубчастої передачі електропоїзда серії EP відповідає формулі:

$$Z(3_1) = 3_{11}(3_{111} + 3_{112}) + 3_{12}(3_{121}). \quad (1)$$

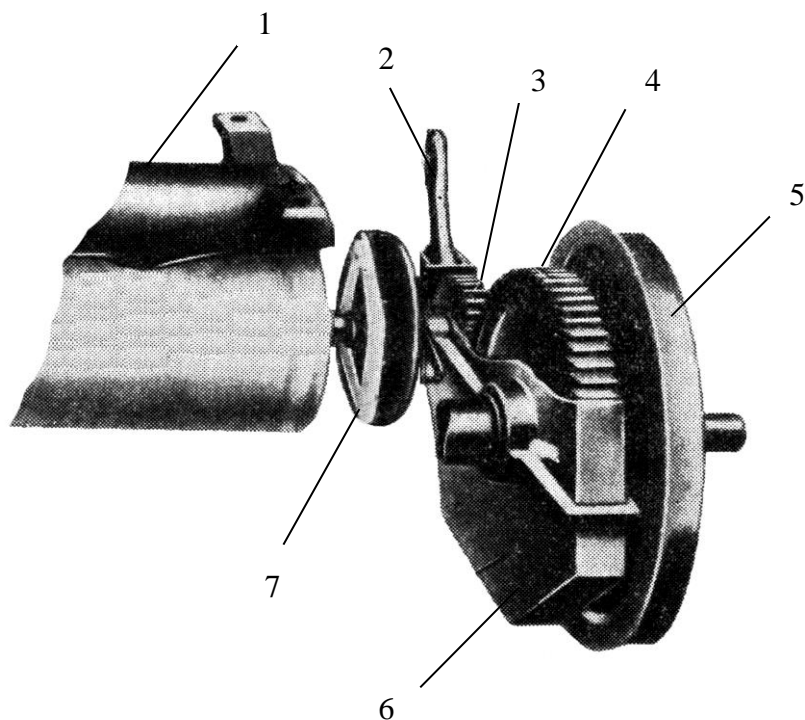


Рис. 3. Схема тягової передачі електропоїзда EP-2:

1 – тяговий електричний двигун; 2 – стержень підвішування редуктора;
3 – шестірня; 4 – зубчасте колесо; 5 – колісна пара; 6 – нижня половина кожуха редуктора; 7 – гумо-кордова муфта

Висновки. Поданий у статті модульно-декомпозиційний опис дає змогу проводити більш детальний аналіз із визначенням пошкоджень складових елементів модулів конструкції ТП. Так, за результатами аналізу пошкоджень ТП, що розглядається, на частку модуля ТЗП у цілому припадає до 63 %. При цьому пошкодження шестерні

складає близько 78 %, кожухів редуктора – 2 %, елементів закріплення – 19 %, зубчастого колеса – приблизно 1 %. Запропонований підхід доцільно використовувати при вирішенні проектно-конструкторських задач з удосконалення конструкції та підвищення надійності ТП сучасного ТРС та МВРС.

Список використаних джерел

1. Бирюков, И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог [Текст] / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – М. : Транспорт, 1986. – 256 с.
2. ChengWang, Shou-renWang, Gao-qiWang. A method for calculating gear meshing efficiency by measured data from gear test machine [Text] // Measurement. – 2018. – Vol. 119. – P. 97–101.
3. Шацилло, А. А. Тяговый привод электроподвижного состава [Текст] / А. А. Шацилло. – М. : Транспорт, 1961. – 222 с.
4. Калихович, В. Н. Тяговые приводы локомотивов: устройство, обслуживание, ремонт [Текст] / В. Н. Калихович. – М. : Транспорт, 1983. – 111 с.
5. Медель, В. Б. Подвижной состав электрических железных дорог. Конструкция и динамика [Текст] / В. Б. Медель. – М. : Транспорт, 1974. – 232 с.

6. Мороз, В. І. Новий підхід до класифікації тягових приводів рухомого складу залізниць [Текст] / В. І. Мороз, О. В. Братченко, С. В. Бобрицький // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – Донецьк, 2012. – Вип. 29. – С. 162-166.

7. Мороз, В. І. Основи конструювання і САПР [Текст] : навч. посібник / В. І. Мороз, О. В. Братченко, В. В. Ліньков. – Харків : Нове слово, 2003. – 194 с.

8. Братченко, О. В. Блочно-ієрархічне описання конструкції енергетичних установок сучасних тепловозів [Текст] / О. В. Братченко // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 143. – С. 47-54.

9. Цукало, П. В. Електропоезда ЭР2 и ЭР2Р [Текст] / П. В. Цукало, Н. Г. Ерошкин. – М. : Транспорт, 1986. – 359 с.

Павшенко Андрій Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри механіки і проектування машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.(057) 730-10-53. E-mail: mpmkafedra@gmail.com.

Бобрицький Сергій Владиславович, канд. техн. наук, доцент кафедри механіки і проектування машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.(057) 730-10-52. E-mail: mpmkafedra@gmail.com.

Громов Володимир Ігорович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.(057) 730-10-53. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Павшенко Андрей Васильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры механики и проектирования машин Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.(057) 730-10-53. E-mail: mpmkafedra@gmail.com.

Бобрицкий Сергей Владиславович, канд. техн. наук, доцент кафедры механики и проектирования машин Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.(057) 730-10-52. E-mail: mpmkafedra@gmail.com.

Громов Владимир Игоревич, аспирант кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.(057) 730-10-53. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Pavshenko Andriy, PhD. Sc. Associate Professor, department mechanical engineers and designing the machines Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.(057) 730-10-53. E-mail: mpmkafedra@gmail.com.

Bobritskiy Sergiy, PhD. Sc. Associate Professor, department mechanical engineers and designing the machines Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.(057) 730-10-52. E-mail: mpmkafedra@gmail.com.

Gromov Vladimir, graduate student of department electric power engineering, electrical engineering and electromechanics State University of Railway Transport. Tel.(057) 730-10-53. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 15.05.2018 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 625.17

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАСПОРА КОЛЕИ СО СКРЕПЛЕНИЯМИ ТИПА КБ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПАСНОЙ ШИРИНЫ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ

Старш. преп. В. В. Новиков, д-р техн. наук С. В. Панченко,
канд. техн. наук А. А Скорик

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РОЗПОРУ КОЛІЇ ЗІ СКРПЛЕННЯМИ ТИПУ КБ ТА ЙОГО ВПЛИВУ НА ВИЗНАЧЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНОЇ ШИРИНИ РЕЙКОВОЇ КОЛІЇ

Старш. викл. В. В. Новіков, д-р техн. наук С. В. Панченко,
канд. техн. наук О. О Скорик

INVESTIGATION INTO THE CONDITIONS CAUSING TERMINAL-BOLTED TRACK GAUGE WIDENING AND CONSIDERATION OF IT IN THE CRITICAL GAUGE CALCULATION

**Snr. Lecturer V. V. Novikov, D. Sc. (Tech) S. V. Panchenko, PhD (Tech.),
Associate Prof. O. O. Skoryk**

На основани анализа предыдущих исследований ведущих ученых и научно-исследовательских организаций железнодорожного транспорта поставлена и решена актуальная научная задача определения максимальной опасной ширины рельсовой колеи с железобетонными шпалами и креплением типа КБ. Все полученные результаты и рекомендации дифференцированы по диапазонам грузонапряженности участков железных дорог и позволяют существенно повысить скорости движения и сроки эксплуатации рельсовых плетей.

Ключевые слова: опасная ширина рельсовой колеи, железобетонные шпалы, крепление типа КБ, грузонапряженность, рельсовые плети.

У чинному нормативному документі Укрзалізниці – Інструкції з улаштування та утримання колії залізниць України – найбільша допустима величина ширини рейкової колії складає 1548 мм, яку було науково обґрунтовано лише для використання як підрейкової основи дерев'яних шпал через можливість виникання за певних умов провалювання коліс рухомого складу, розкатування рейок через наявність можливості висмикування шурупів. Але при улаштуванні колії із залізобетонними шпалами, розкатування рейок неможливе через жорстке болтове притиснення підкладок до шпал та рейок. За наявності на рейках у безстиківій колії із залізобетонними шпалами значних розмірів бічного зносу або корозійних ушкоджень металевих підкладок у зоні кріплення закладних болтів, визначене значення небезпечної ширини рейкової колії є заниженим та економічно недоцільним через необхідність передчасної заміни рейкових плетей. Тому виникає необхідність уточнення та обґрунтування максимально допустимої величини ширини рейкової колії з підрейковою основою на залізобетонних шпалах. Для досягнення цієї мети необхідним є проведення

експериментальних досліджень з найгіршими реальними умовами притиснення рейок до шпал. На основі аналізу попередніх досліджень провідних вчених і науково-дослідних організацій залізничного транспорту поставлено та вирішено актуальну наукову задачу визначення максимальної небезпечної ширини рейкової колії з залізобетонними шпалами та скріпленням типу КБ, з урахуванням одночасної дії бічної сили і сили розпору колії, а так само з урахуванням усіх відомих допусків і факторів впливу в умовах застосування нових ремонтних профілів залізничних коліс найбільш масового рухомого складу. Всі отримані результати і рекомендації диференційовані за діапазонами вантажонапруженості ділянок залізниць і дають змогу суттєво підвищити швидкості руху і терміни експлуатації рейкових плітей для максимального використання їх ресурсу.

Ключові слова: небезпечна ширина рейкової колії, залізобетонні шпали, скріплення типу КБ, вантажонапруженість, рейкові пліті.

In the current regulatory document UZ – Instructions for the device and the content Railways of Ukraine, the largest permissible value of track gauge – 1548mm, which was scientifically proved only for use as a sub-rail base wooden sleepers due to the possibility of the occurrence under certain conditions of falling of the wheels of the rolling stock, rails unfolding through the availability of pulling and screws. But, for tracks with concrete sleepers, rails unfolding not possible due to the hard bolt pressing pads to the sleepers and rails. In the presence on rails in the undocking way with reinforced concrete sleepers of the considerable sizes of lateral wear or corrosion damages of metal substrates in a zone of fastening of mortgage bolts, the certain value of dangerous width of a rail track is underestimated and economically inexpedient because of need of premature replacement of rail lashes. Therefore there is a need to clarify and justify the maximum allowable value of the width of a rail track with rail on the basis of concrete ties. To achieve this goal, it is necessary to conduct experimental studies with the worst real conditions of pressing the rails to the sleepers. The acute scientific task of determining maximum dangerous railway track gauge with reinforced concrete sleepers and fastenings of terminal-bolted track type has been set and solved on the base of the analysis of previous researches of leading scientists and scientific-research organizations of railway transport. Taking into account simultaneous actions of lateral force and track thrust force as well as all known tolerances and influences under the conditions of new maintenance profile of railway wheels of the most popular rolling stock, all the obtained results and recommendations have been differentiated according to the ranges of railway sections traffic volume and make it possible to increase running speeds and lifetime of long-welded rails substantially to use their service life to the maximum.

Keywords: dangerous railway track gauge, reinforced concrete sleepers, fastenings of terminal-bolted track type, railway sections traffic volume, long-welded rails, rolling stock.

Введение. На современном этапе исследования работы железнодорожного пути со скреплениями типа КБ, которые уже эксплуатируются в пути более 50 лет преобладает утверждение, что опасное распирание колее на железобетонных шпалах со смешанным клеммно-болтовым промежуточным рельсовым скреплением невозможно, и нормы содержания пути не учитывают конструкцию подрельсового основания, а регламентируют одну для всех

подрельсовых оснований максимальную опасную величину ширины рельсовой колее – 1548 мм.

Анализ последних исследований и публикаций. Современные представления о возможности распирания колее с провалом колеса в колее с железобетонным подрельсовым основанием основаны на утверждении, что для возникновения условий распора колее нужно, чтобы критическая величина отжатия головки

рельса в кривих участках с максимальной шириной колеи 1545 мм, при которой разрешается движение с установленными скоростями, составляла 31 мм [1]. Но это утверждение не имеет под собой никакого экспериментального или теоретического научного обоснования, кроме одного очень важного явления – уменьшения расстояния между внутренними гранями колес вагонов из-за перегрева ободов во время служебного торможения на 10 мм [2]. Но не опубликовано ни одного исследования, где учитываются условия возникновения распора колеи.

Определение цели и задания исследования. Целью данного исследования является определение, на основании выполненных авторами ранее исследований [6], опасной максимальной ширины рельсовой колеи с промежуточными рельсовыми скреплениями типа КБ в зависимости от грузонапряженности участков и с учетом новых факторов влияния. Они возникли в течение последних 15–20 лет и связаны с созданием новых ремонтных профилей колес подвижного состава, а также с авторскими исследованиями влияния процессов износа промежуточных рельсовых скреплений типа КБ на появление упругих люфтов в боковом направлении от подвижного состава.

Основная часть исследования. Условия возникновения распора колеи определяются возникновением дополнительной боковой распорной силы из-за кочения фаской обода колеса ($\phi = 6$ мм) по выкружке головки рельса, которая действует на оба рельса и определяется как горизонтальная составляющая вертикальной нагрузки плоскости (α_3) и выражается (при $\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{1}{m_\phi}$, где $\frac{1}{m_\phi}$ – конусность фаски) как

$$Y_{расп} = \frac{P_\epsilon}{m_\phi}, \quad (1)$$

где P_ϵ – вертикальная нагрузка от колеса на головку рельса в зоне бокового скругления головки с боковой рабочей гранью, с учетом коэффициента динамической нагрузки $K_\delta = 1,9$ при прохождении стыковых соединений, с величиной крутящего момента на гайках стыковых болтов $M_{кр} = 200$ Нм, минимального допустимого усилия, по рекомендациям профессора Клинова С. И. и к.т.н. Кондратьева О. О. (МИИТ).

По типовой методике определения опасного значения ширины рельсовой колеи [3] достаточно определить только начальное положение колеса на головке рельса, которое опирается на головку рельса переходной зоной качения от (m_1) до (m_2) на расстоянии 5 мм до начала скругления головки рельса (рис. 1),

$$S_{онас} = h_0 + \mu + T_{\min} + a - x_{\min} \quad (x_{\min} = 47 \text{ мм}).$$

В качестве дополнительных факторов влияния, которые исследуются в данной работе, впервые приняты следующие:

- допуск на уменьшение ширины обода $\Delta a = 4$ мм [1];
- наиболее наблюдаемое значение уменьшения расстояния между внутренними гранями колес через изгиб оси колесной пары через буксовые узлы $\epsilon_T = 4$ мм [4];
- наибольшее значение уменьшения расстояния между внутренними гранями вагонных колес (рис. 2) из-за температурных деформаций ободов колес после проведения служебного торможения $\epsilon_{T(\Delta t)} = 10$ мм [1–3];
- учет новых ремонтных профилей с геометрическими размерами, приведенными в табл. 1 по данным [7, 8];
- величина бокового отжатия головки рельсовой нити $Y_{расп}$ при одновременном действии вертикального $P_1 = P_B \cdot K_D$ и боковой нагрузки Y_B с учетом боковой распорной силы H_m

$$H_B = Y_B + H_m. \quad (2)$$

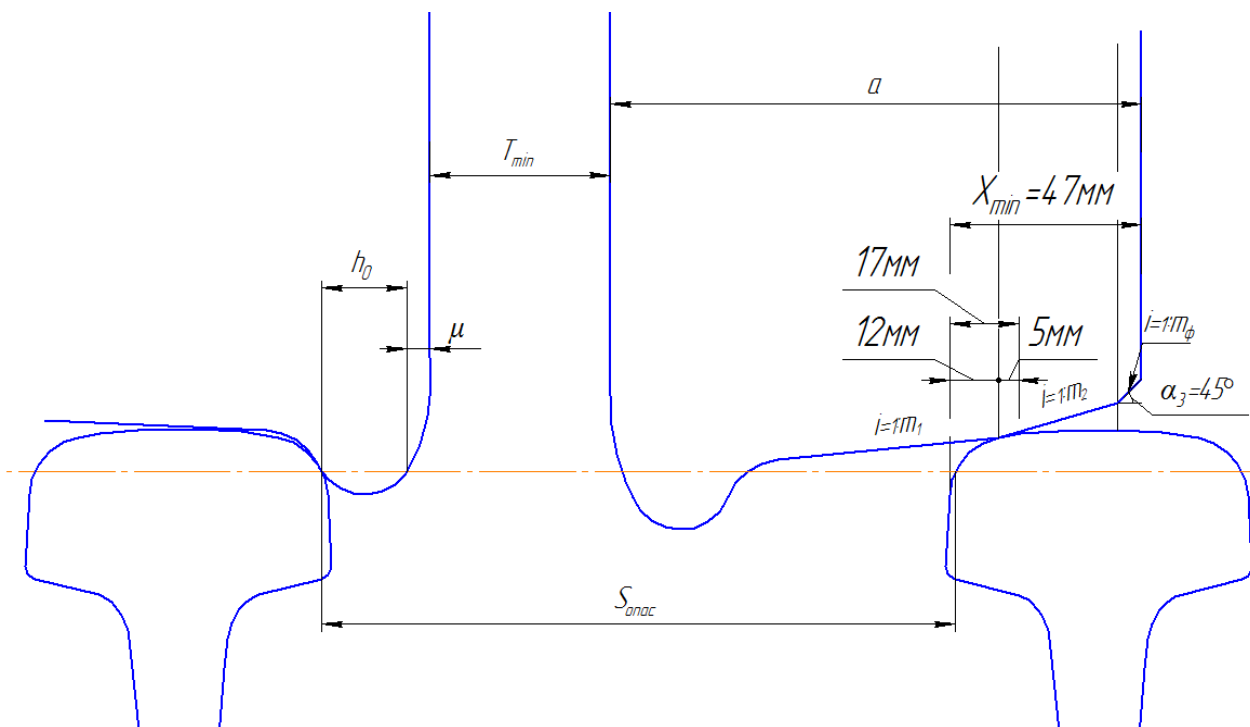


Рис. 1. Классическая расчетная схема определения опасного значения ширины колеи ($S_{опас}$) без учета многих дополнительных факторов влияния и явления распора колеи

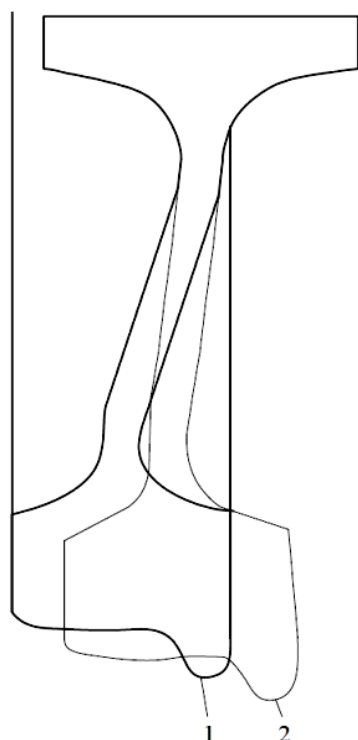


Рис. 2. Перемещение начального профиля обода колеса (1) при максимальном нагреве (2)

Величина бокового отжатия головки рельса

$$Y_{расн} = (A + B \cdot P_v \cdot K_d) \cdot H_B, \quad (3)$$

где $A = 6.7 \cdot 10^{-4}$, $B = 0.024 \cdot 10^{-6}$ – при грузонапряженности участка пути $\Gamma \leq 40$ млн ткм брутто/км.г. или $A = 8.4 \cdot 10^{-4}$, $B = 0,034 \cdot 10^{-8}$ – при грузонапряженности участка пути $\Gamma \geq 41$ млн ткм брутто/км.г. (исследовано экспериментально автором в работе [6]);

P_v – статическая вертикальная нагрузка колес на головку рельса;

K_d – коэффициент вертикальной динамики, $K_d = 1,9$.

С учетом факторов влияния получено алгоритм определения опасного значения ширины рельсовой колеи, при котором возможен опасный распор колеи

$$S_{опас} = (A_0 - \Delta a) - 2Y_{расн}, \quad (4)$$

$$S_{расч} = h_0 + T_{\min} - \varepsilon_{T(\Delta r)} - \Delta a + a - c - d, \quad (5)$$

$$A_0 = h_0 + T_{\min} - \varepsilon_{T(\Delta r)} - \varepsilon_m + a - \Delta a - \varphi, \quad (6)$$

$$Y_{[\max]} = (A_0 - \Delta a) - S_{кр. \max}, \quad (7)$$

где $S_{кр. \max} = 1545 \text{ мм}$ [5];

h_0 – минимальная толщина гребня колеса, мм;

T_{\min} – минимальная ширина насадки колеса;

$\varepsilon_{T(\Delta r)} = 10 \text{ мм}$ – изменение ширины колесной пары за счет изменения температуры при служебном торможении [1, 2];

$\varepsilon_T = 4 \text{ мм}$ – изменение ширины колесной пары за счет изгиба оси колесной пары [4];

a – ширина обода по чертежам [7, 8]; приведена в табл. 1;

$\Delta a = 4 \text{ мм}$ – допуск на сужение обода колеса при его изготовлении [1];

$\varphi = 6 \text{ мм}$ – ширина фаски на ободу колеса.

Результаты расчетов приведены в таблице.

Выводы: на основании анализа полученных результатов с учетом того, что контакт колеса и рельса происходит не в точке, а по эллипсу с шириной $a_{эл} = 5 \text{ мм}$ (максимальное значение согласно с [4]), можно рекомендовать следующие значения опасной ширины колеи:

- участки пути с грузонапряженностью $\Gamma < 40$ млн ткм брутто/км.г.

$$S_{опас} = 1568 - 5 = 1561 \text{ мм};$$

- участки пути с грузонапряженностью $\Gamma \geq 41$ млн ткм брутто/км.г.

$$S_{опас} = 1555 - 5 = 1550 \text{ мм}.$$

Именно при такой ширине колеи, но не более, можно разрешить движение с установленными скоростями при условии, что все указанные единицы подвижного состава допущены к движению на данных участках колеи.

Полученные результаты доказывают необходимость проведения в дальнейшем детальных исследований для более расширенного круга единиц подвижного состава чем те, которые были рассмотрены, так как отсутствовали графики-паспорта бокового воздействия на рельсовую колею для современного подвижного состава. Необходимо рассмотреть все имеющиеся на железных дорогах Украины единицы подвижного состава и также перспективные локомотивы и вагоны для того, чтобы получить всеобъемлющие результаты и разработать окончательные рекомендации относительно максимальной опасной ширины колеи, которую необходимо нормировать для участков бесстыкового пути, которые имеют железобетонное подрельсовое основание не только со скреплениями типа КБ, но и другими типами скреплений.

Таблиця

Основные расчетные характеристики ремонтных профилей с конической поверхностью качения и результаты расчетов опасной ширины колеи при $\max S_{\text{кр}} = 1545 \text{ мм}$ [4]

Ремонтные профили (нормативная база)	С, мм	а, мм	m ₂	h ₀ , мм	S _{min} , мм	[Y _{max}], мм	S _{расп} , мм	Тип подвижного состава	Y _{расп} , мм		S _{опас} , мм	
									Г < 40 млн ткм брутто/пкм брутто/км·г.	Г ≥ 41 млн ткм брутто/пкм брутто/км·г.	Г < 40 млн ткм брутто/пкм брутто/км·г.	Г ≥ 41 млн ткм брутто/пкм брутто/км·г.
ДИИТ-УЗ (ЦГ-ЦЛ-0062, рис. 5, а)	20	130	3,5	33	1581	32	1551	груз. ваг. пас. ваг.	4,5 7,8	20 19,06	1572 1569	1557 1558
ГОСТ 9036-38 (ЦГ-ЦЛ-0062, рис. 5, б)	30	130	10	33	1581	32	1541	груз. ваг. пас. ваг.	3,1 6,0	13,8 14,68	1574 1571	1563 1562
Профиль грузовых и рефрижераторных вагонов (ЦГ-ЦЛ-0062, рис. 5, в)	30	130	10	30	1578	29	1538	груз. ваг. и рефриж. ваг.	6,0	14,68	1568	1559
ДСТУ ГОСТ 11018-2005 шабл. РЛ I МУ 23311.3514.002 (ВНД-32.0:07.001-2001 рис. 6.16)	40	140	3,5	33	1600	51	1550	ЧС-4	5,6	23,4	1590	1572
Черт. 4. ДСТУ ГОСТ 001ТУУ 23111.3534-002 (ВНД-32.0:07.001-2001 рис. 6.17)	30	130	3,5	32,318	1579,3	30,3	1550,3	ТЭП-60 пас. ваг.	4,5	21,24 20,06	1591 1570	1574 1555
По чертежам 2 ГОСТ 9036 (ВНД-32.0:07.001-2001 рис. 6.18)	30	130	10	32,318	1579,3	30,3	1550,3	груз. ваг.	3,1	13,8	1572	1561

Список использованных источников

1. Лысюк, В. С. Причины и механизмы схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов [Текст] / В. С. Лысюк. – изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 2002. – 215 с.
2. Температурные поля, деформации и напряжения в цельнокатаных вагонных колесах при различных режимах торможения [Текст] / С. Н. Киселев, В. Г. Иноземцев [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – № 7. – 1994. – С. 12-14.
3. Alonso, A. Wheel-rail contact: Roughness, heat generation and conforming contact influence [Text] / A. Alonso, J. G. Gimenez // Tribology International. – 2008. – Vol. 41, Issue 8. – P.755–768. doi: 10.1016/j.triboint.2008.01.004.
4. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь [Текст] : учеб. для вузов ж.-д. трансп / Г. М. Шахунянц. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. :Транспорт, 1987. – 479 с.
5. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України [Текст] / Е. І. Даніленко, А. М. Орловський, М. Б. Курган [та ін.]. – К. : ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. – 456 с.
6. Новіков, В. В. Визначення умов проведення експериментальних досліджень впливу вертикальних та бічних сил від коліс рухомого складу на бічні відтиснення головки рейки при підрейковій основі з залізобетонними шпалами [Текст] / В. В. Новіков, О.О. Скорик // науч. тр. SWorld. – Иваново : Научный мир, 2015. – Вып. № 2 (39). – С. 47-50.
7. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм [Текст] : ВНД 32.0.07.001 – 2001 (нова редакція). – К., 2011. – 168 с.
8. Інструкція з огляду, обстеження, ремонту та формування вагонних колісних пар [Текст] : ЦТ-ЦЛ-0062 / Держ. адмін. залізнич. трансп. України. – К., 2005. – 103 с.

Новіков Вадим Володимирович, старш. викладач кафедри нарисної геометрії і комп'ютерної графіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. : +38 (057) 730-10-55. (067) 841-53-27. E-mail: novikoff.vadim2013@gmail.com.

Панченко Сергій Володимирович, д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. : +38 (057) 730-10-13. E-mail: info@kart.edu.ua.

Скорик Олексій Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії і колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. : +38 (057) 730-10-10. E-mail: dek-str@kart.edu.ua.

Новиков Вадим Владимирович, старш. преподаватель кафедры начертательной геометрии и компьютерной графики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: +38(057) 730-10-55. (067)841-53-27. E-mail: novikoff.vadim2013@gmail.com.

Панченко Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации и компьютерного телеуправления движением поездов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: +38(057) 730-10-13. E-mail: info@kart.edu.ua.

Скорик Алексей Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: +38(057) 730-10-10. E-mail: dek-str@kart.edu.ua.

Novikov Vadim, Senior Lecturer, Department of Descriptive Geometry and Computer Graphics Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38(057) 730-10-55. E-mail: novikoff.vadim2013@gmail.com.

Panchenko Sergiy, D.Sc. (Tech), Professor, Department of Automation and computer-integrated technologies Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38(057) 730-10-13. E-mail: info@kart.edu.ua.

Skoryk Olexiy, PhD (Tech.), Associate Prof, Department of The Track and Track Facilities Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38(057) 730-10-10. E-mail: dek-str@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 16.05.2018 р.

УДК 621.314

**ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ТЯГОВОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗМІННОГО СТРУМУ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ
4QS-ВИПРЯМЛЯЧІВ**

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій,
магістрант А. В. Гладка (Нац. аерокосм. ун-т «Харківський авіаційний інститут»)

**УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ
4QS-ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ**

Кандидаты техн. наук В. П. Нерубацкий, А. А. Плахтий, магистрант А. В. Гладкая
(Нац. аэрокосм. Ун-т «Харьковский авиационный институт»)

**EMC IMPROVEMENT RESEARCH OF THREE-PHASE ACTIVE RECTIFIERS WITH
POWER FACTOR CORRECTION IN REGENERATIVE MODE**

PhD, sen. L V. P. Nerubatskyi, O. A. Plakhtiy, master student F.V. Gladka

У статті наведено систему керування вхідного 4Q-випрямляча, що реалізує коефіцієнт потужності тягового електропривода в режимах тяги та рекуперації близький до одиниці. Корекція коефіцієнта потужності реалізується як у режимі активного випрямляча, так і в режимі рекуперації. Виконано дослідження процесів в активному випрямлячі у програмному пакеті Matlab та виконано аналіз якості енергії. Запропоновано систему керування, яка реалізує режим рекуперації з високими енергетичними показниками.

Ключові слова: рекуперація, активний підвищувальний випрямляч, корекція коефіцієнта потужності.

В статье приведена система управления входящего 4Q-выпрямителя, которая реализует коэффициент мощности тягового электропривода в режимах тяги и рекуперации приближенный к единице. Коррекция коэффициента мощности реализуется как в режиме активного выпрямителя, так и в режиме рекуперации. Выполнены исследования процессов в активном выпрямителе в программном пакете Matlab и выполнен анализ качества энергии. Предложена система управления, которая реализует режим рекуперации с высокими энергетическими показателями.

Ключевые слова: рекуперация, активный повышающий выпрямитель, коррекция коэффициента мощности.

One of promising areas of energy efficiency in railway transport is application of four-quadrant AC/DC converter with high power factor on the traction substations. The thyristor and diode three-phase rectifiers, which used on the AC/DC traction substations, have a number of drawbacks. In some cases, they do not provide the ability to recover energy, but also they are powerful source of current harmonic for general industrial electric grid. The presence of higher harmonics in power grid has the following negative consequences: distortion of the supply voltage; pickup in telecommunication and control circuits; heating and additional losses in transformers and electrical machines, which are powered from the power supply system; reducing the efficiency of the power supply system and technical devices.

There are various topologies of active rectifier circuits for correction of power factor. However, it is worth noting that not all topologies of active rectifiers allow to implement bidirectional energy transfer. Neither VAA rectifier circuit nor single-circuit three-phase rectifiers do not realize recovery. An optimal circuit for the recovery is the circuit of an active three-phase booster rectifier. The circuit allows to control the output voltage in the active rectifier mode, as well as the power factor close to one, both in the active rectification mode and in the recuperation mode. There are various control systems for active rectifier with correction of power factor. The most promising control systems are: hysteresis control system, vector control system and direct power control system. A significant advantage of a hysteresis control system is its relative simplicity of implementation, high reliability, high realized power factor.

The disadvantage of hysteretic control system is the inability to implement the recovery process. In the work, the control system AB is proposed, which implements recovery with a high power factor.

This article provides an overview of four-quadrant power conversion of active rectifier. This scheme allow implementation the following options: power factor correction, sinusoidal input current, eliminating harmonic in input current, regulation of the output voltage of the rectifier, energy recovery in the network. The article presents the optimal control scheme for three-phase four-quadrant AC/DC converter.

Keywords: *four-quadrant power conversion, three-phase active boost rectifier, power factor correction.*

Вступ. Одним із перспективних напрямків енергозбереження на електрорухомому складі є застосування асинхронного електропривода з рекуперативним гальмуванням. При цьому є актуальною задача реалізації процесу рекуперації з високою якістю енергії рекуперування.

Застосовувані в даний час на тягових підстанціях перетворювальні установки не забезпечують необхідну якість електричної енергії, що повертається в мережу змінного струму. Пов'язано це з досить великою величиною реактивної потужності та високим вмістом вищих гармонік. Ця обставина ставить завдання пошуку шляхів вдосконалення перетворювальних установок, що реалізують рекуперацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати досліджень систем електропостачання в режимі рекуперації з використанням тиристорних перетворювачів досить повно описані в роботах [1, 3, 4]. Сучасний рівень розвитку силової електроніки дає змогу реалізувати високоефективні системи перетворення електричної енергії. Так, застосування активних випрямлячів (АВ) [2, 5] дає

можливість підвищити коефіцієнт потужності практично до одиниці при прямому перетворенні електричної енергії. Але при цьому залишається не до кінця вирішеною проблема роботи таких перетворювачів в режимі рекуперації.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є створення і дослідження системи керування активним випрямлячем, що реалізує високу якість електричної енергії в режимі рекуперації. Завдання дослідження полягають у створенні системи керування активним трифазним підвищувальним випрямлячем, що дає змогу реалізувати режими активного виправлення та рекуперації з високими енергетичними показниками, та створенні імітаційної моделі і проведенні віртуальних випробувань для визначення енергетичних показників з запропонованою системою керування.

Основна частина дослідження. Топологія рекупераційного активного випрямляча. Існують різні топології схем АВ, що забезпечують корекцію коефіцієнта потужності [2, 5]. Однак слід зазначити, що не всі топології АВ дають змогу

реалізувати двосторонню передачу енергії. Ані схема Вієна-випрямляча, ані одноключові трифазні випрямлячі не реалізують рекуперацію. Оптимальною схемою для реалізації рекуперації є схема активного трифазного підвищувального

випрямляча (рис. 1). Схема дає змогу здійснювати регулювання вихідної напруги в режимі активного випрямляча, а також близький до одиниці коефіцієнт потужності як у режимі активного випрямлення, так і в режимі рекуперації.

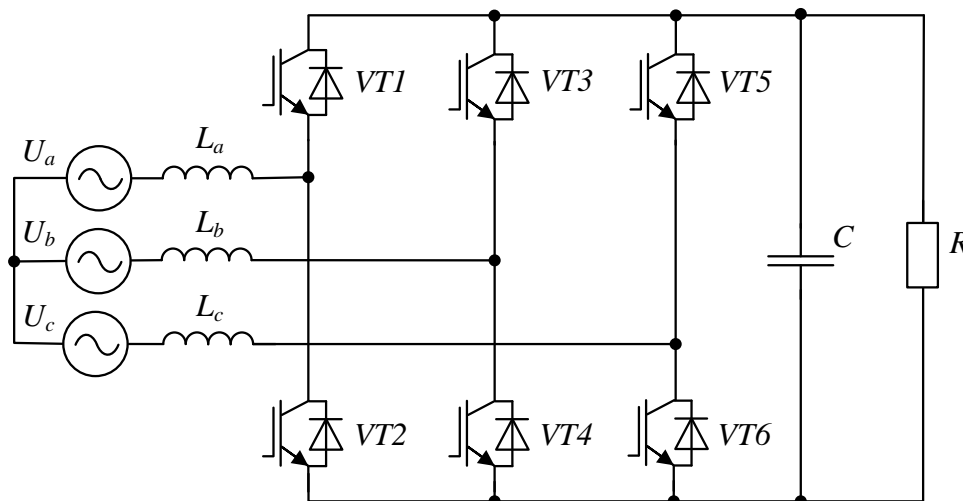


Рис. 1. Схема активного трифазного підвищувального випрямляча

Система керування активного випрямляча. У [2, 5] розглянуто різні системи керування (СК) активним підвищувальним випрямлячем з корекцією коефіцієнта потужності. Найбільш перспективними системами керування АВ є: гістерезисна СК, векторна СК і система прямого керування потужністю. Значною перевагою гістерезисної системи керування є її відносна простота реалізації, висока надійність, високий реалізований коефіцієнт потужності. Структуру гістерезисної системи керування подано у [5].

Недоліком гістерезисної СК є неможливість реалізації процесу рекуперації. У роботі пропонується система керування АВ, що реалізує рекуперацію з високим коефіцієнтом потужності (рис. 2).

До складу системи керування (рис. 2) входять: U_c – вихідна напруга активного випрямляча; U_{sa} , U_{sb} , U_{sc} – миттєві значення фазних напруг АВ; I_{sa}^* , I_{sb}^* , I_{sc}^* – сигнал

задання форми фазних струмів АВ; i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} – миттєві значення фазних струмів АВ; i_{sam} , i_{sbm} , i_{scm} – масштабовані миттєві значення фазних струмів АВ; Δi_a , Δi_b , Δi_c – сигнали неузгодженості фазних струмів; U_{out}^* – сигнал задання рівня вихідної напруги АВ; U_{recup}^* – сигнал задання рівня вихідної напруги при якому АВ входить у режим рекуперації.

Опис процесів у запропонованій СК.

Регулювання вихідної напруги. Сигнал вихідної напруги U_c і сигнал задання вихідної напруги U_{out}^* подаються на суматор $\Sigma 1$. Сигнал помилки e подається на ПІ-регулятор. Вихідний сигнал ПІ-регулятора e_{pi} і сигнали фазних струмів i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} подаються на множники X1, X2, X3. Вихідні сигнали множників i_{sam} , i_{sbm} , i_{scm} повторюють форму фазних струмів, однак із заданою амплітудою, необхідною для підтримки заданого рівня вихідної напруги U_{out}^* .

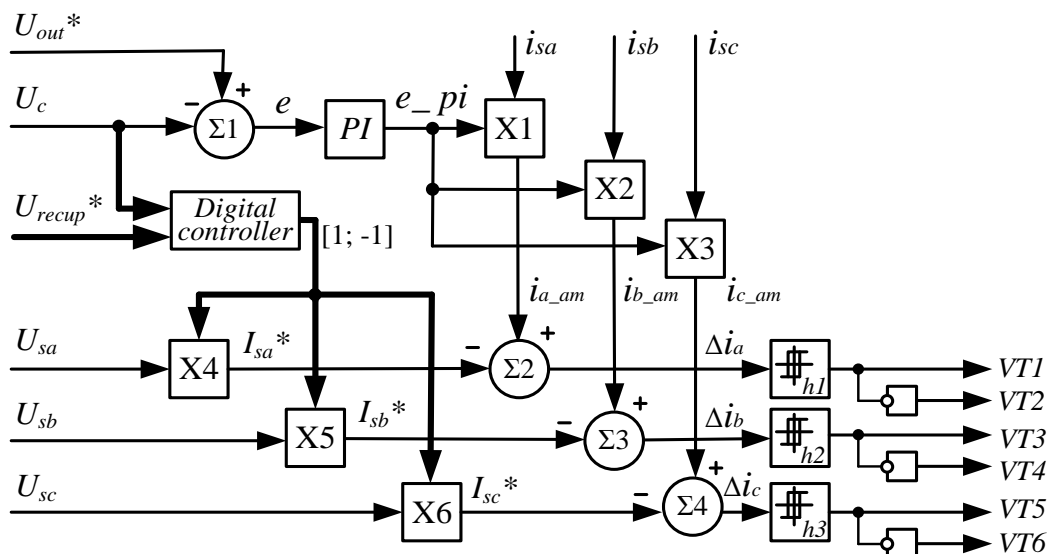


Рис. 2. Запропонована система керування АВ

Канал вибору режиму роботи АВ.

Канал позначений на рис. 2 жирними лініями. Перехід з режиму випрямлення в режим рекуперації і назад досягається за допомогою блока цифрового контролера. На цифровий контролер подаються сигнали вихідної напруги АВ (U_c) і сигнал задання рівня рекуперації (U_{recup}^*). У разі $U_c > U_{recup}^*$, на виході контролера буде сигнал, що дорівнює одиниці. При цьому сигнали фазних напруг U_{sa} , U_{sb} , U_{sc} на множниках X4, X5, X6 помножуються на одиницю (тобто не змінюються). Внаслідок цього сигнали задання форми фазних струмів активного випрямляча I_{sa}^* , I_{sb}^* , I_{sc}^* будуть синфазними з фазними напругами U_{sa} , U_{sb} , U_{sc} . При цьому АВ працює в режимі активного випрямлення.

А якщо $U_{recup}^* > U_c$, то на виході контролера буде негативний сигнал, рівний -1. Внаслідок цього на множниках X4, X5, X6 сигнали задання форми фазних струмів активного випрямляча I_{sa}^* , I_{sb}^* , I_{sc}^* будуть у протифазі фазним напругам U_{sa} , U_{sb} , U_{sc} , що переводить АВ у режим рекуперації.

Реалізація синусоїдальної форми фазного струму. Сигнали задання форми фазних струмів активного випрямляча I_{sa}^* , I_{sb}^* , I_{sc}^* і масштабовані миттєві значення фазних струмів АВ $i_{a\ am}$, $i_{b\ am}$, $i_{c\ am}$

подаються на множники $\Sigma 2$, $\Sigma 3$, $\Sigma 4$. Сигнали Δi_a , Δi_b , Δi_c представляють сигнали неузгодженості фазних струмів, тобто фактичне відхилення миттєвого значення фазного струму від його сигналу задання.

Сигнали неузгодженості струмів фаз подаються Δi_a , Δi_b , Δi_c на гістерезисні розподільники імпульсів $h1$, $h2$, $h3$. Гістерезисні розподільники мають задану величину гістерезису, яка фактично формує синусоїдальну форму фазного струму.

На прикладі фази А: якщо $i_{a\ am} - I_{sa}^* = \Delta i_a > (hyst / 2)$ (тобто фактичний струм вище заданого значення), то з $h1$ ключ на $VT1$ подається сигнал відкриття (на $VT2$ сигнал закриття), при цьому струм фази А падає. Коли струм зменшиться нижче величини гістерезису, при якому $\Delta i_a < -hyst / 2$ (тобто фактичний струм нижчий за задане значення), то на ключ $VT1$ подається сигнал закриття (на $VT2$ сигнал відкриття), при цьому струм фази А зростає. Таким чином, при заданні досить малої величини гістерезису форма фазного струму буде синфазною з напругою і практично мати синусоїдальну форму. Фази В і С мають ідентичний принцип керування. Графічно принцип керування наведено на рис. 3.

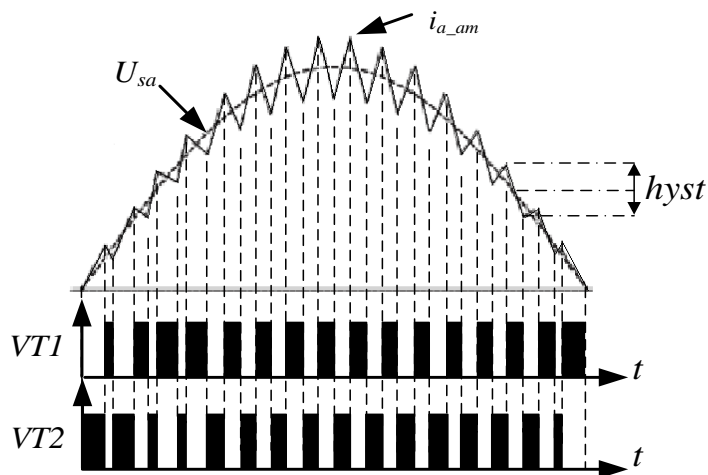


Рис. 3. Форма напруги та струму фази А; сигнал керування на ключ VT1

Модельовання роботи запропонованої системи керування активного випрямляча. У програмному пакеті Matlab було побудовано модель АВ із запропонованою системою керування (рис. 4). Виконано модельовання АВ при

динамічному переході з режиму активного випрямлення в режим рекуперації. Визначено коефіцієнт гармонічних спотворень струмів та реалізовано коефіцієнт потужності активного випрямляча.

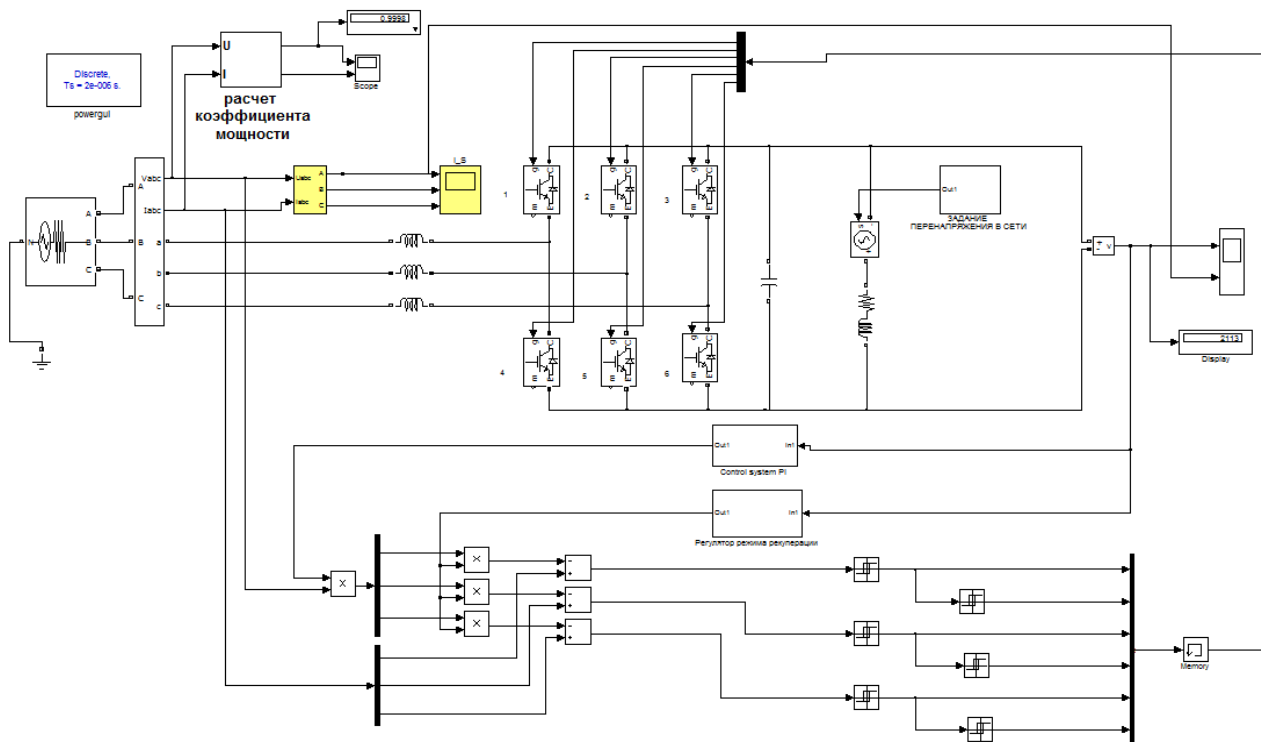


Рис. 4. Модель Matlab АВ із системою керування, що реалізує рекуперацію енергії в мережу

Змодельована система керування АВ регулює вихідну напругу в діапазоні від 2500 В до 4000 В. Перехід у режим рекуперації здійснюється при досягненні вихідної напруги рівня 4500 В у результаті переведення навантаження з режиму двигуна в режим генератора. При цьому

контур зворотного зв'язку вихідної напруги здійснює інверсію сигналу задання фазної напруги.

На рис. 5 наведено осцилограми вихідної напруги АВ і форми фазних струмів і напруг АВ при переході з режиму активного випрямляча в режим рекуперації.

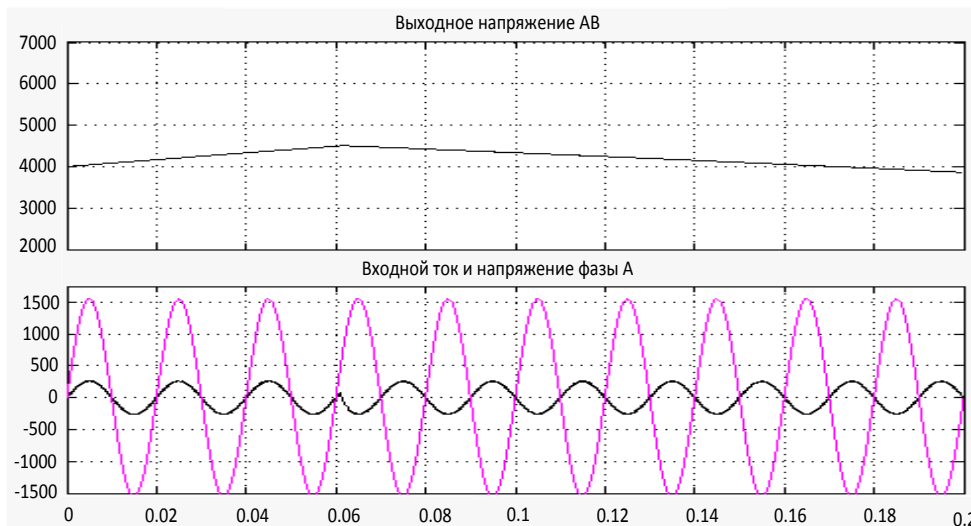


Рис. 5. Напруги та струми фаз активного випрямляча при переході з режиму активного випрямляча в режим рекуперації

Як видно з рис. 5, запропонована система керування АВ реалізує форму фазних струмів близьку до синусоїди і $\cos(\varphi)$ близький до одиниці як у режимі

активного випрямлення, так і в режимі рекуперації. На рис. 6 наведено Фур'є-аналіз форми фазного струму при живленні АВ у режимі активного випрямляча.

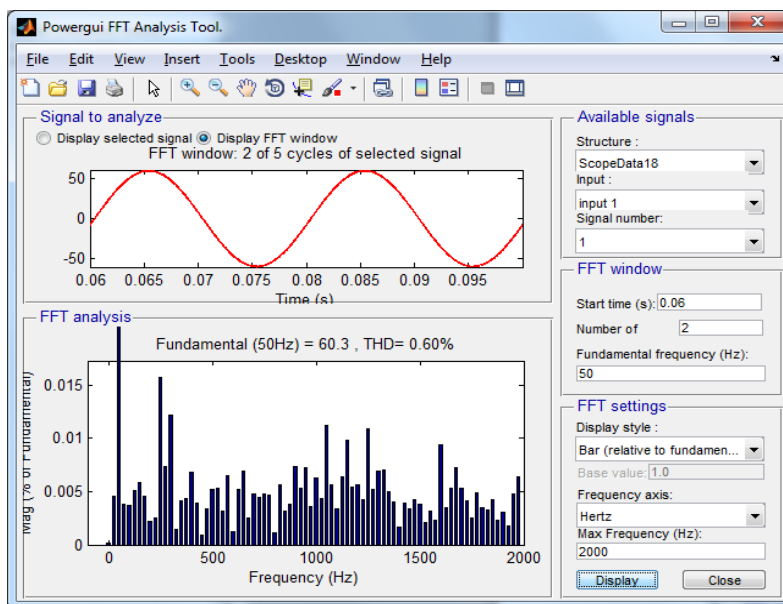


Рис. 6. Фур'є-аналіз форми вхідних струмів (режим активного випрямляча)

На рис. 7 наведено Фур'є-аналіз форми рекупераційного струму.

Результати проведеного моделювання. Енергетичні показники в режимі активного випрямляча:

- коефіцієнт потужності дорівнює $PF = 99,98 \%$;

- коефіцієнт гармонічних спотворень фазних струмів $THD = 0,60 \%$.

Енергетичні показники в режимі рекуперації:

- коефіцієнт потужності дорівнює $PF = -99,98 \%$;

- коефіцієнт гармонічних спотворень фазного струму $THD = 0,61 \%$.

Висновки. Розроблена система керування активного трифазного підвищувального випрямляча дає змогу реалізувати режими активного випрямлення і рекуперації з високими енергетичними показниками. Результати моделювання розробленої системи керування активним випрямлячем підтверджують можливість реалізації режимів активного випрямляча та режиму рекуперації з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці.

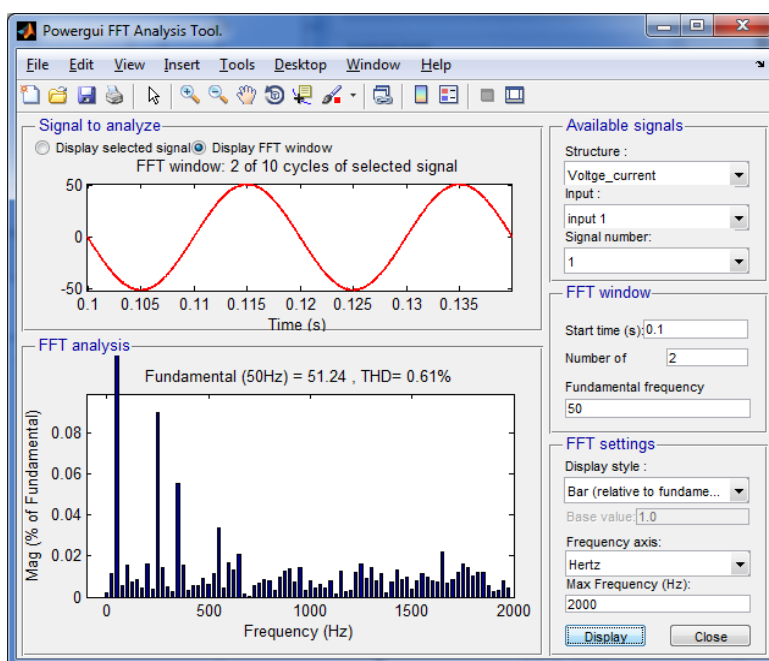


Рис. 7. Фур'є-аналіз форми фазних струмів АВ при роботі в режимі рекуперації

Список використаних джерел

1. Стационарная система аккумуляирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе емкостных накопителей энергии [Текст] / Ю. А. Бродский, А. И. Подаруев, В. Н. Пупынин, М. В. Шевелюгин // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 38-41.
2. Казачковский, Н. Н. Управление активным выпрямителем с релейно-векторным контуром тока для систем частотно-регулируемого электропривода [Текст] / Н. Н. Казачковский // Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту : сб. наук. праць. – Маріуполь, 2008. – Вип. 18. – Ч. 2. – С. 40-43.
3. Кучумов, В. А. Рекуперация электроэнергии: достижения и резервы [Текст] / В. А. Кучумов, Б. Н. Ребрик // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 11. – С. 14-22.
4. Носов, В. И. Эффективность рекуперации можно повысить: опыт Западно-Сибирской дороги [Текст] / В. И. Носов // Локомотив. – 2004. – № 1. – С. 65-72.

5. Mao, H., Boroyevich, D., Ravindra, A., Lee, F. Analysis and Design of a High Frequency Three-Phase Boost Rectifier [Text] // IEEE Applied Power Electronics Conference, 1996 Record. – P. 538-544.

Нерубацький Володимир Павлович, канд. техн. наук, старш. викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua.

Плахтій Олександр Андрійович, канд. техн. наук, старш. викл. кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Гладка Ангеліна Валеріївна, магістрант факультету програмної інженерії та бізнесу Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». E-mail: angelina_gladkaya@gmail.com.

Нерубацький Владимир Павлович, канд. техн. наук, старш. преп. кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua.

Плахтий Александр Андреевич, канд. техн. наук, старш. преп. кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-76. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Гладкая Ангелина Валерьевна, магистрант факультета программной инженерии и бизнеса Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». E-mail: angelina_gladkaya@gmail.com.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD, senior lecturer of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua.

Plakhtiy Alexandr Andreevich, PhD, senior lecturer of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-76. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Gladka Angelina Valeriivna, master of the program engineering and business faculty of the National Aerospace University named after M. E. Zhukovsky «KhAI». E-mail: angelina_gladkaya@gmail.com.

Статтю прийнято 18.05.2018 р.

УДК 656.023

ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

Кандидати техн. наук С. М. Продащук, Г. В. Шаповал, магістранти О. В. Тоцька, О. В. Марченко, Д. О. Белан

ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗКАХ

Кандидаты техн. наук С. Н. Продащук, А. В. Шаповал, магистранты О. В. Тоцкая, О. В. Марченко, Д. А. Белан

INTRODUCTION OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN PASSENGER TRANSPORTATION

Ph.D. Candidates of Techn. Scien. S. Prodashchuk, G. Shapoval, master student O. Totska, O. Marchenko, D. Bielan

У статті запропоновано впровадити високошвидкісний пасажирський рух в Україні за технологією SkyWay. Проведено аналіз існуючого стану високошвидкісних та швидкісних перевезень на залізницях України та аналіз динаміки пасажиропотоків на різних видах

транспорту для визначення конкурентоспроможності запропонованої технології на транспортному ринку. На базі статистичних досліджень запропоновано оптимальний маршрут для впровадження інноваційної технології SkyWay.

Ключові слова: SkyWay, динаміка пасажиропотоків, високошвидкісний рух, пасажирські перевезення.

В статье рассмотрена возможность внедрения высокоскоростного пассажирского движения в Украине по технологии SkyWay. Проведен анализ существующего состояния высокоскоростных и скоростных перевозок на железных дорогах Украины и анализ динамики пассажиропотоков на разных видах транспорта для определения конкурентоспособности предложенной технологии на транспортном рынке. На основе статистических исследований предложен оптимальный маршрут для внедрения инновационной технологии SkyWay.

Ключевые слова: SkyWay, динамика пассажиропотоков, высокоскоростное движение, пассажирские перевозки.

The article considers the possibility of introducing high-speed passenger traffic in Ukraine using SkyWay technology. The analysis of the existing state of high-speed transportation on the railways of Ukraine is carried out. Due to the deterioration of railways and rolling stock, the maximum speed is 120 km/hours. High-speed traffic requires high-speed line or magnetic suspension. And the railway track in Ukraine was not replaced.

Currently, Ukrainian railways require more competition and motivation to improve the efficiency of work and the quality of services, as well as public investment. To introduce high-speed traffic in Ukraine, it is necessary to significantly modernize the railway tracks, which is quite expensive.

Today, the most optimal option for the introduction of high-speed transport in Ukraine is the construction of a new main for the launch of string transport. This is a special car on steel wheels, placed on string rails, which are held on supports. Strings are reliably protected from external influences by an armored body and composite filler.

The dynamics of passenger traffic on different types of transport is also analyzed. Based on these data, the competitiveness of the proposed SkyWay technology in the transport market was determined. Based on the data of the State Statistics Service of Ukraine, the analysis of the time series was carried out.

When implementing the proposed technology, taking into account all the above parameters, a tariff for transportation is proposed that is close to the established tariff for the flight between the known points.

An oriented graph is constructed and the intensity of passenger traffic is calculated to determine the cities with the most stable indicators. An optimal route for the introduction of innovative technology SkyWay is proposed. This is the route Kiev - Lviv.

Based on the results of the economic impact assessment, the payback period of the new Kyiv-Lvov highway will be about 15 years. This will allow the railways to obtain additional profits from passenger transportation, which at this time are unprofitable.

Keywords: SkyWay, dynamics of passenger flows, high-speed traffic, Passenger Transportation.

Вступ. Пасажирські перевезення відіграють особливу роль у діяльності транспорту та задоволенні потреб населення у пересуванні. Однак, відповідно до статистичних даних за 2016 рік, збитки

від цих перевезень склали 11 млрд грн. За підсумками першого півріччя 2017 року «Укрзалізниця» отримала 4,93 млрд грн чистих збитків [1, 2].

В Україні через зношеність залізничних колій та рухомого складу максимальна швидкість, з якою можуть рухатися поїзди, – 120 км/год. І це тільки поїзди категорії «Інтерсіті+». Швидкість руху вітчизняних поїздів є значно меншою. В Україні відсутні високошвидкісні перевезення, оскільки високошвидкісний транспорт – це транспорт, який рухається зі швидкістю більше 200 км/год звичайними та більше 250 км/год – спеціалізованими коліями. Як правило, для руху таких поїздів потрібні високошвидкісні магістралі або магнітна підвіска. При впровадженні поїздів категорії «Інтерсіті+» виробництва компанії «Hyundai Rotem» залізничне полотно не було змінено. Проведений аналіз швидкості руху поїздів категорії «Інтерсіті+» при проходженні коліями ПАТ «Укрзалізниця» протягом 2017 року [3] свідчить про те, що середня маршрутна швидкість складає лише 96,1 км/год.

Досвід експлуатації денних швидкісних поїздів підтверджує доцільність їх впровадження. Тому сьогодні актуальним є завдання впровадження швидкісного залізничного транспорту в Україні, що дасть змогу підвищити конкурентоспроможність, скоротити збитковість пасажирських перевезень та забезпечити розвиток української залізниці. Але для того щоб отримати максимальний прибуток від швидкісних пасажирських перевезень, необхідно дослідити попит на ці перевезення на певних напрямках з урахуванням мінімізації експлуатаційних витрат залізниці [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання впровадження швидкісного руху в Україні досліджували Бутько Т. В. [5], Кірдіна О. Г. [6], Ломотько Д. В. [7], Прохорченко А. В. [8, 9] та багато інших вчених.

Впровадження високошвидкісного руху потребує вирішення багатьох задач. Досі проводяться дослідження щодо економічної доцільності, геополітичного

розташування, можливих маршрутів, динаміки пасажиропотоків та ін. Міністерством інфраструктури 22 лютого 2018 р. підписано меморандум про запуск проекту транспортних інновацій НуреUA. Саме ним розпочнуть «розвиток новітніх транспортних технологій в Україні, в першу чергу швидкісної транспортної системи «Hyperloop»[10].

В роботі [5] теоретично обґрунтовано підходи щодо формування раціональної топології мережі швидкісних залізничних перевезень, які нададуть змогу забезпечити підвищення економічної ефективності перевезення пасажирів швидкісними поїздами. Для вирішення поставленої задачі в роботі розроблено математичну модель еволюційного розвитку транспортної системи на основі поєднання фізичної гравітаційної моделі для визначення кореспонденцій потоків пасажирів та методу системи мурашиних колоній для пошуку ефективного варіанта розвитку топології мережі.

В умовах впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів виникає необхідність у визначенні раціональної топології залізничної мережі для максимального задоволення потреб на ринку транспортних послуг. У роботі [8] проведено аналіз сучасного стану досліджень у галузі проблем проектування мереж та запропоновано модель для пошуку раціональної мережі залізниць яка дасть змогу визначити топологію мережі, що відповідає реальним умовам функціонування залізниць України.

Для оптимізації діяльності залізничних вузлів при здійсненні швидкісних пасажирських перевезень у роботі [11] запропонована модель визначення оптимальної кількості рейкових автобусів, яка реалізована у вигляді дворівневої задачі стохастичного програмування з квантильним критерієм, яка дає можливість здійснювати розподіл транспортних одиниць за напрямками залежно від випадкового попиту на перевезення та оптимальних

тарифів на перевезення. У [12] запропоновано нову концепцію формування оптимальних тарифів на перевезення.

Визначення мети і завдання дослідження. Метою роботи є удосконалення технології перевезень пасажирів високошвидкісним транспортом за рахунок впровадження струнного транспорту на основі прогнозних значень обсягів пасажиропотоку на залізницях України.

Для досягнення поставленої мети необхідним є розв'язання таких завдань: проведення статистичного аналізу часового ряду обсягів перевезення пасажирів залізницями України та її конкурентами між містами України; визначення оптимального маршруту для впровадження високошвидкісних перевезень.

Основна частина дослідження. Найоптимальнішим варіантом для розвитку високошвидкісного транспорту в Україні є побудова нової магістралі для впровадження струнного транспорту. Це спеціальний автомобіль на сталевих колесах, розміщений на струнних рейках, встановлених на опорах. Одною з основних переваг SkyWay є те, що в ньому не використовуються зараз модні, але малоефективні, енергоємні, ненадійні і небезпечні системи, такі як магнітна підвіска, повітряна подушка, ефект екрана, турбіна, реактивний двигун тощо. Порівняно з іншими видами транспорту SkyWay має найнижчу вартість транспортної системи, найменші витрати палива. Для початку цілком достатньо швидкості 350–450 км/год. [13].

Для оптимального функціонування інноваційного транспорту необхідно проаналізувати обсяги перевезення пасажирів залізницями України, аби передбачити поведінку системи та її здатність до адаптації. На сьогодні задача прогнозування є актуальною та невід'ємною частиною щоденної роботи багатьох компаній. На раціональне планування роботи залізничного транспорту великий вплив мають прогнозні

значення обсягів перевезень вантажів і пасажирів [14].

Часові ряди обсягів перевезення пасажирів – це дані спостережень, які не відображають додаткової інформації (наприклад, вплив зовнішніх факторів: політичної ситуації, державного регулювання, сезонності та ін.), але прогнози, виконані за їх допомогою, є найбільш точними. Статистичний аналіз часових рядів необхідний для побудови математичної моделі прогнозування обсягів пасажиропотоку на залізничному транспорті при впровадженні струнного транспорту.

Було проведено аналіз часового ряду. Аналіз проводився на основі даних Державної служби статистики України з 2010 р. по 2016 р. (рис. 1, 2).

При статистичному аналізі помітне значне скорочення пасажиропотоку на залізничному транспорті. Водночас скоротився пасажиропотік на автомобільному та водному транспорті, хоча автомобільний транспорт на сьогоднішній день залишається лідером пасажирських перевезень. На авіаційному транспорті, навпаки, спостерігається збільшення кількості перевезених пасажирів та досягнення її стабільності. Така тенденція обґрунтовується введенням безвізу, скороченням пасажиропотоку у напрямку до Російської федерації, значним зносом залізничної інфраструктури, як наслідок низька швидкість руху. Тобто конкуренцію залізничному транспорту на даному етапі може скласти повітряний, адже він набагато швидший та комфортніший. Конкурувати з повітряним транспортом залізничний може у питаннях безпеки, надійності, масовості, зниження сумарного забруднення довкілля та встановлення низьких тарифів на перевезення. При впровадженні денних високошвидкісних поїздів з урахуванням усіх вищезазначених параметрів, що характерні для повітряного транспорту, доцільно встановити тариф на перевезення, приблизний встановленому тарифу на переліт між певними пунктами.

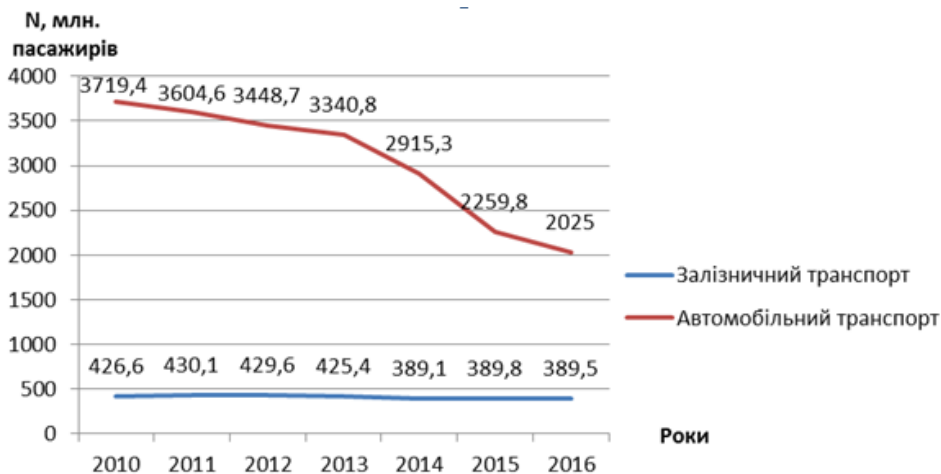


Рис. 1. Аналіз динаміки пасажиропотоків на залізничному та автомобільному транспорті за період з 2010 по 2016 рр., млн пас.

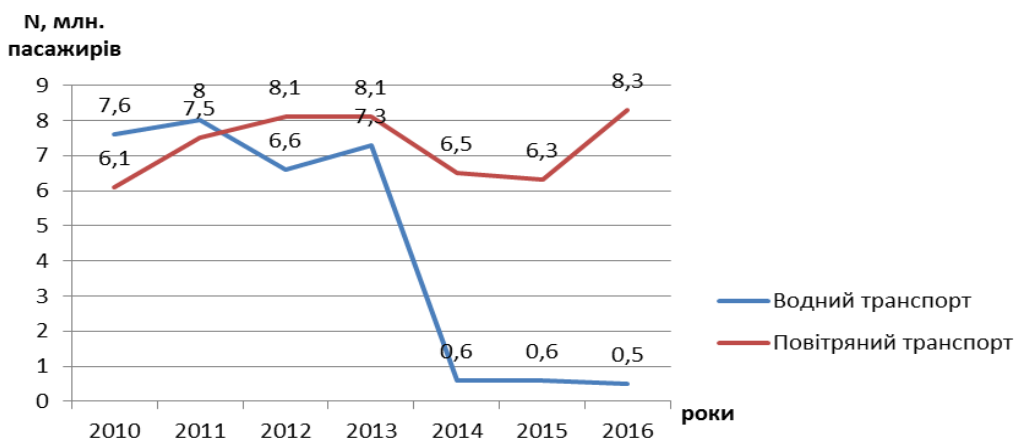


Рис. 2. Аналіз динаміки пасажиропотоків на повітряному та водному транспорті за період з 2010 по 2016 рр., млн пас.

Для доцільного впровадження високошвидкісного транспорту необхідно керуватися кількістю перевезених пасажирів та відстанню між станціями для зменшення одноразових витрат та строку окупності. Було побудовано орієнтовний граф та визначено інтенсивність пасажиропотоку. Інтенсивність переходу елемента з одного стану в інший стан:

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{t}; \quad (1)$$

де t – час переходу елемента з одного стану в інший.

Висока інтенсивність пасажиропотоку спостерігається на напрямках Харків–Київ, Харків–Дніпро, Львів–Київ та Дніпро–Київ (рис. 3). А найчастіше українці їздять з Києва до Харкова та з Києва до Львова. У них майже однакові показники.

Для ефективного вирішення питання впровадження високошвидкісного транспорту в Україні проведено дослідження пасажиропотоку між найбільшими

станціями за наведеною статистикою Міністерства інфраструктури [15]. Аналіз

даних виконано за допомогою програмного продукту STATISTICA [16].

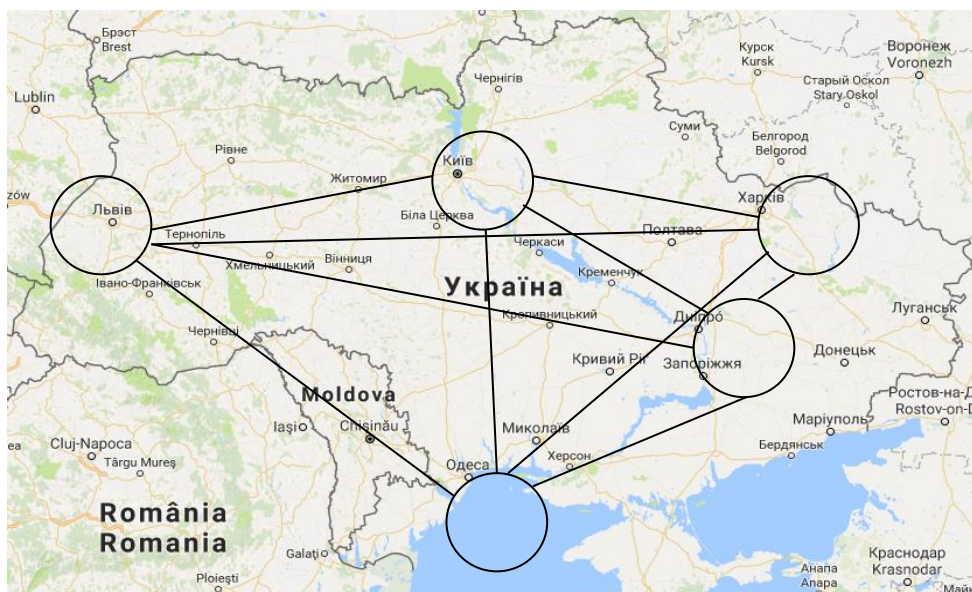


Рис. 3. Орієнтовний граф інтенсивності пасажиропотоків

На гістограмі (рис. 4) наведені криві щільності нормального розподілу. Статистика Колмогорова – Смирнова дорівнює приблизно 0,3. Чим менше ця величина, тим ближче розподіл випадкової величини до нормального. З наведеної гістограми зроблено висновок, що найбільший пасажиропотік спостерігається на станції м. Київ. Тому при впровадженні високошвидкісного транспорту пунктом відправлення обрано м. Київ. До того ж середня заробітна плата жителів м. Київ за вересень 2017 року склала 11423 грн, що значно перевищує середньомісячну зарплату по будь-якій області України окремо майже вдвічі. Для порівняння, у Харківській області середня заробітна плата – 6660 грн, в Одеській – 6624 грн, Львівській – 6784 грн, Київській – 7274 грн, що є підставою для припущення про можливість жителів Києва дозволити собі користуватися транспортом з високою вартістю проїзду [15].

При виборі пункту призначення було проведено порівняння наступних міст з

найбільшими обсягами пасажиропотоку: Львів, Харків та Одеса.

Для статистичного аналізу застосовано одновимірний спектральний аналіз Фур'є, який використовується для аналізу неперіодичних сигналів, для врахування коливання пасажиропотоків та визначення міста з найбільш стабільними показниками.

Одеса – курортне місто. На рис. 5 видно, що пасажиропотік зростає саме в часи курортного сезону.

Результати одновимірного аналізу показують три найбільших піки періодограми за частотою (рис. 6). Найбільший з них – на частоті 0,0811 (рис. 6, а). Частота 0,0811 відповідає значенню 12 періоду, тобто кількості одиниць часу, необхідних для повного циклу, що чітко відображено на графіку спектральної щільності (рис. 6, б). У даному випадку за одиниці часу обрано місяці року [16]. Тобто наявна циклічність у 12 місяців (1 рік). Різке збільшення обсягів пасажиропотоку спостерігається щоліта, після чого йде на спад.

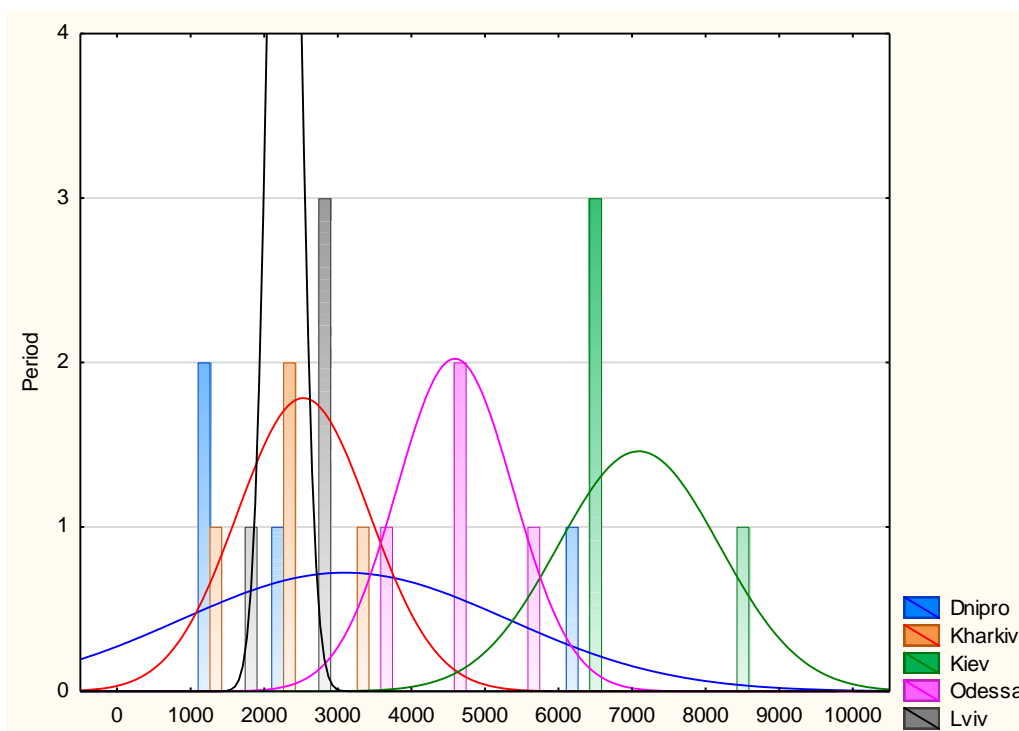


Рис. 4. Гістограма обсягів пасажиропотоку найбільших станцій України

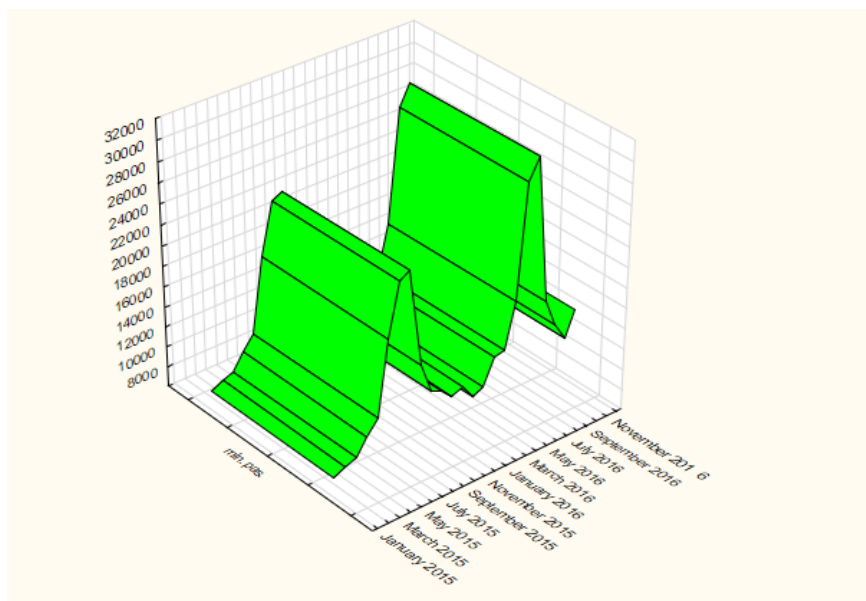


Рис. 5. Обсяги пасажиропотоку м. Одеса за період 2015–2016 рр.

Сезонна компонента відіграє важливу роль у впровадженні високошвидкісного транспорту та впливає на завантаженість рухомого складу. Тобто існує припущення, що через нестабільність системи, в курортний період інноваційним транспортом

будуть користуватися частіше, а після – пасажиропотік зменшиться і потреба в запуску поїздів скоротиться, а отже, збільшиться строк окупності та тариф на перевезення.

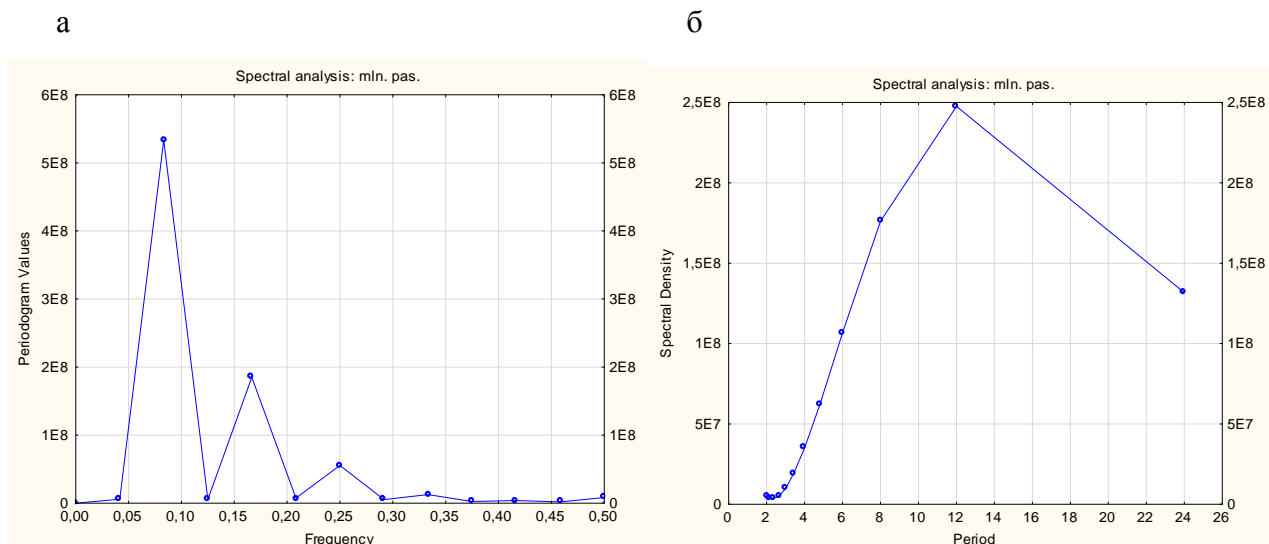


Рис. 6. Спектральний аналіз часового ряду:
а – графік періодограми; б – графік спектральної щільності

Харків – це столиця студентства, тож основною частиною пасажирів є молодь, яка не має можливості користуватися транспортом з високою вартістю проїзду і використовує надані пільги на проїзд.

Проведено аналіз пасажиропотоку м. Харків (рис. 7).

Для того щоб уникнути випадкових коливань, періодограму було згладжено

(рис. 8, а). Два найвиразніших піки зображено на частотах 0,0857 та 0,252. Їм відповідають значення періодів 4 місяці та 12 місяців відповідно (рис. 8, б). Тобто обсяги пасажиропотоків зростають щороку через кожні 4 місяці. Графік періодограми більш циклічний, ніж для м. Одеса.

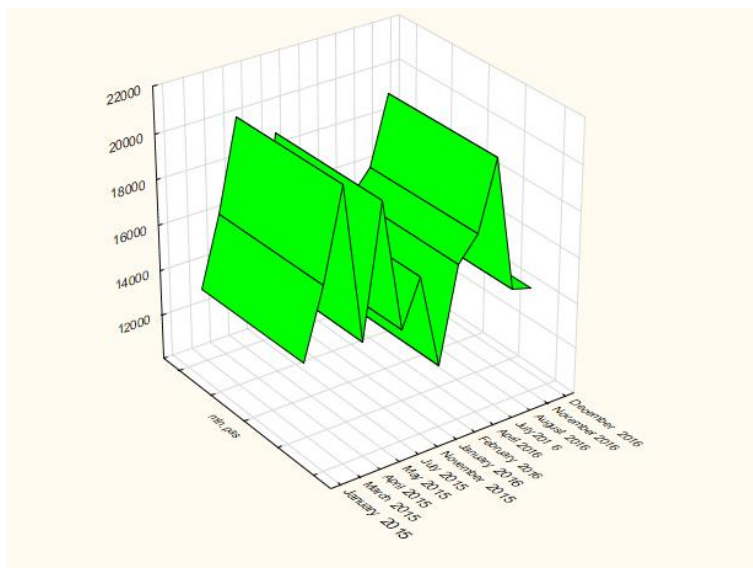


Рис. 7. Обсяги пасажиропотоку м. Харків за період з 2015 до 2016 рр.

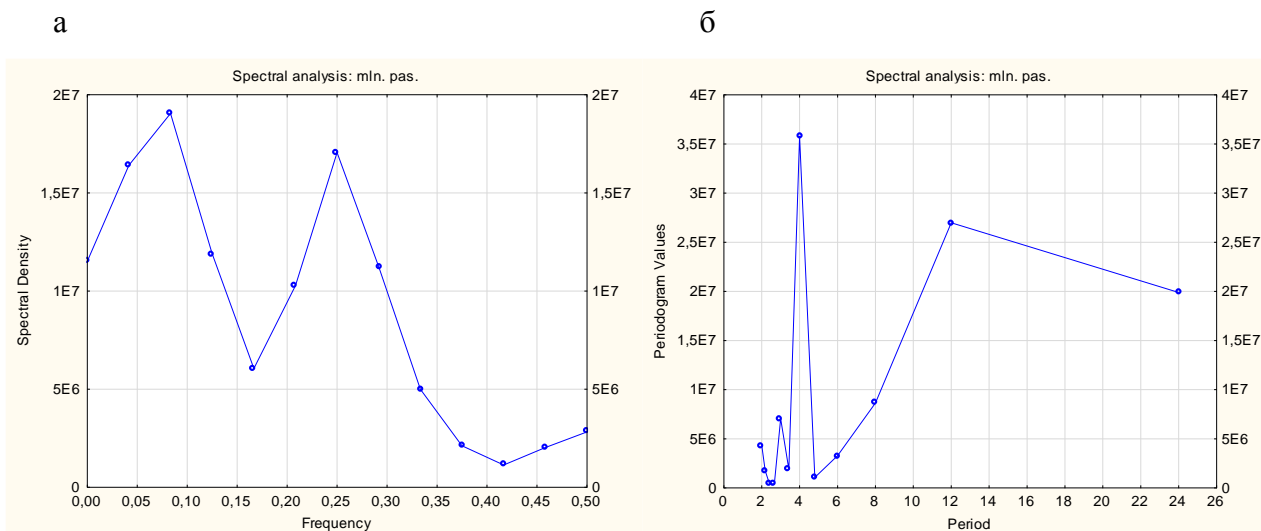


Рис. 8. Спектральний аналіз часового ряду:
а – графік спектральної щільності; б – графік періодограми

До Львова їдуть з усієї України, і в основному це туристичний потік, який протягом двох років є стабільним (рис. 9). Відповідно до проведеного статистичного аналізу визначено, що пасажиропотоки до м. Харків та м. Львів подібні. Сезонна

компонента спостерігається, але не така значна, як для пасажиропотоку до м. Одеса. Тобто у цих напрямках завжди спостерігатиметься необхідність у перевезеннях.

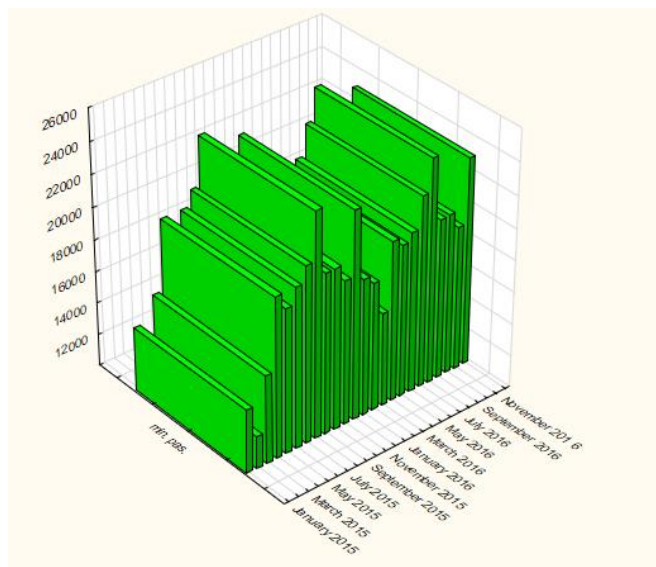


Рис. 9. Обсяги пасажиропотоку м. Львів за період з 2015 до 2016 рр.

На графіку спектральної щільності (рис. 10, а) виявлено три найбільших піки на частотах 0,0833, 0,25 та 0,50.

Найбільший з них – на частоті 0,0833. Тобто з року в рік для повного циклу необхідно 4 місяці.

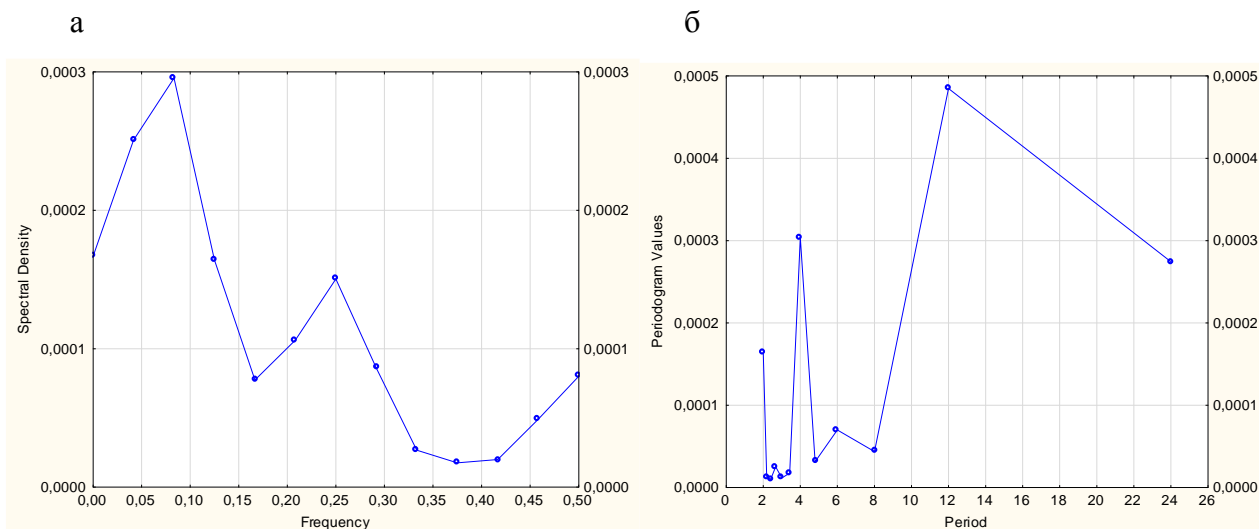


Рис. 10. Спектральний аналіз часового ряду:
 а – графік спектральної щільності; б – графік періодограми

Для впровадження інноваційного транспорту SkyWay потрібен стабільний пасажиропотік. Аналіз пасажиропотоку м. Одеса не задовольняє цю умову через низьку циклічність. Циклічність пасажиропотоків міст Харків та Київ однакова – 4 місяці. Отже, обсяги перевезень не значно вплинуть на стабільність системи у порівнянні з показниками м. Одеса.

Для кінцевого результату було порівняно обсяги пасажиропотоків м. Харків та м. Львів за період з 2015 по 2016 рр. (рис. 11). На гістограмі чітко виражено перевагу пасажиропотоків м. Львів. Тому впровадження високошвидкісного транспорту доцільно запропонувати на маршруті Київ–Львів.

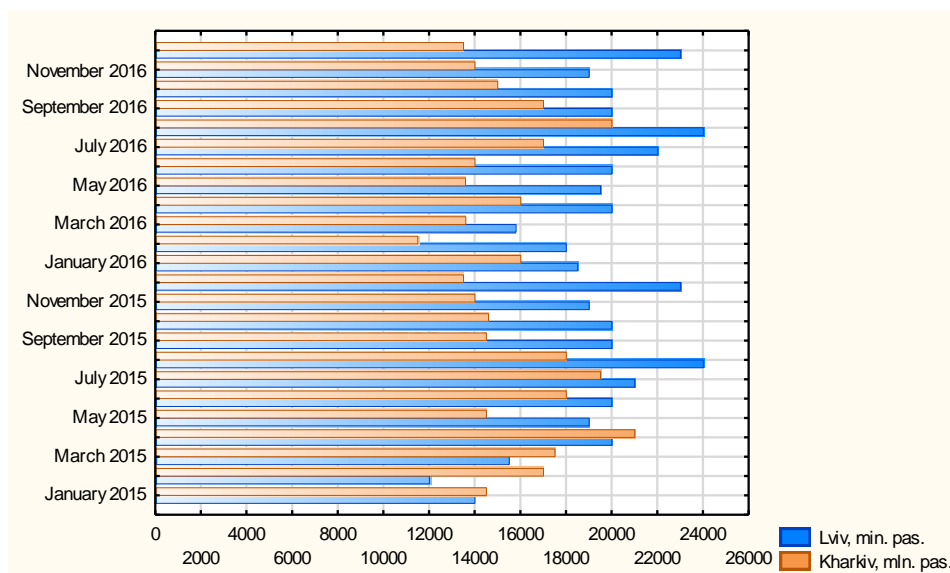


Рис. 11. Обсяги пасажиропотоків м. Харків та м. Львів за період з 2015 по 2016рр.

Для економічного обґрунтування інноваційного впровадження для обраного маршруту розроблено модель:

$$R_{zaz}(L, N, M) = \sum_{i=1}^k (C_{od_i} + C_{ek_i}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де L – відстань між пунктами обслуговування пасажирів, км;

N – кількість юнібусів, шт.;

M – кількість рейсів, шт.;

i – кількість маршрутів упровадження, шт.;

C_{od_i} – одноразові витрати, грн;

C_{ek_i} – експлуатаційні витрати, грн.

при обмеженнях

$$\begin{cases} L_{розр} \geq L_{\min} \\ N \geq \frac{P_{\max}}{n} \\ \frac{24}{tN} \leq M \\ t_{\min} \leq t \leq 24 \end{cases}, \quad (3)$$

де t – тривалість повного обігу, год;

P_{\max} – максимальний пасажиропотік за добу, пас.;

n – кількість посадочних місць в юнібусі, шт.

Одноразові витрати

$$C_{od_i} = C_{np_i} + C_{ест_i} + C_{рс_i} + C_{ін_i}, \quad (4)$$

де C_{np_i} – вартість проектування, грн;

$C_{ест_i}$ – вартість побудови естакади, грн;

$C_{рс_i}$ – вартість рухомого складу, грн;

$C_{ін_i}$ – вартість інфраструктури, грн.

Експлуатаційні витрати

$$C_{ek_i} = C_{зп_i} + C_{ен_i} + C_{то_i} + C_{н_i}, \quad (5)$$

де $C_{зп_i}$ – витрати на утримання персоналу, грн;

$C_{ен_i}$ – витрати на паливо/електричну енергію, грн;

$C_{то_i}$ – витрати на технічне обслуговування рухомого складу, грн;

$C_{п_i}$ – витрати на утримання станційних пристроїв, грн.

Період окупності

$$D = \frac{R_{zaz}}{PS}, \quad (6)$$

де P – перспективний пасажирообіг за рік, пас.;

S – встановлений тариф на перевезення пасажирів, грн.

Після розрахунків виявлено, що вартість впровадження високошвидкісної системи SkyWay на дільниці Київ – Львів дорівнює близько 42,46 млрд грн з приблизним строком окупності 15 років.

Тариф на перевезення пасажирів інноваційним транспортом має конкурувати з тарифом на повітряні пасажирські перевезення, оскільки відповідає вимогам швидкості та комфортності, до того ж є екологічно безпечнішим. Проте він не повинен його перевищувати, аби не втратити клієнтів. У даному випадку вартість квитка на проїзд в юнібусі може скласти 2068 грн.

Можливе впровадження інноваційного транспорту SkyWay спочатку на невеликій ділянці, аби перевірити, як буде працювати дана технологія, скоригувати недоліки та уникнути непередбачуваних витрат, які можуть виникнути при впровадженні струнного транспорту на ділянках з великими відстанями. Для цього пропонується розглянути ділянку Київ – аеропорт Бориспіль. Мінімальний час проходження даного маршруту – 40 хвилин без урахування заторів. Юнібусом цей шлях можна буде подолати за 6 хвилин. У 2016 році аеропортом Бориспіль скористалося 6,34 млн пас. без урахування

транзитних пасажирів. Враховуючи існуюче завантаження та прогнозні дані, окупиться такий проект через 5 років. Вартість квитка – від 200 грн.

Висновки. Аналіз існуючого стану і розвитку високошвидкісного пасажирського руху в Україні і за кордоном довів, що, на відміну від європейських країн, в Україні немає підтримки залізничної інфраструктури. Близько 90 % складу українських поїздів зношені, залізничні колії потребують капітального ремонту. Тому швидкість перевезення пасажирів у поїздах категорії «Інтерсіті+» досягає максимального значення 160 км/год, а у звичайних поїздах – від 20 км/год до 117 км/год.

Для удосконалення технології перевезень пасажирів в Україні запропоновано впровадження високошвидкісного струнного транспорту. Проведено статистичний аналіз обсягів пасажирських перевезень різними видами транспорту і між різними містами України для визначення доцільного впровадження та допустимого тарифу на перевезення. За результатами оцінки економічного ефекту, період окупності складатиме 15 років, якщо прокласти нову магістраль між столицею України Києвом та Львовом. Це дасть можливість отримати додаткові прибутки залізниці від пасажирських перевезень, які на сьогодні є збитковими.

Список використаних джерел

1. «Укрзалізниця» прогнозує 11 млрд грн. збитків від пасажирських перевезень // 5 канал [Електронний ресурс]. – 12.09.2017. – Режим доступу: URL: <https://www.5.ua/ekonomika/ukrzaliznytsia-prohnozuie-11-mlrd-hrn-zbytkiv-vid-pasazhyrskykh-perevezen-154830.html> (дата звернення: 28.11.2017).
2. Актуальні проблеми «Укрзалізниці» та можливі шляхи її вирішення // ПА «Публічний аудит» [Електронний ресурс]. – 11.10.2017. – Режим доступу: URL: <http://publicaudit.com.ua/reports-on-audit/aktualni-problemi-ukrzaliznitsi-ta-mozhlyvi-shlyahi-yih-virishennya/> (дата звернення: 28.11.2017).
3. Удосконалення систем супутникової навігації при розвитку пасажирського комплексу в умовах швидкісних перевезень [Текст] / В. В. Кулешов, Г. В. Шаповал, А. В. Кулешов [и др.] // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 173. – С. 96-106.
4. Бауліна, Г. С. Визначення ефективності використання швидкісних перевезень на мережі залізниць [Текст] / Г. С. Бауліна, Г. Є. Богомазова, А. В. Скуб'як // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 165. – С. 5-11.
5. Формування моделі розвитку залізничної системи швидкісних перевезень на основі принципів самоорганізації [Текст] / Т. В. Бутько, А. В. Прохорченко, Л. О. Пархоменко, І. В. Копаниця // Вісник нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». – 2011. – № 54. – С. 67-70.
6. Кірдіна, О. Г. Методологічні аспекти інвестиційно-інноваційного розвитку залізничного комплексу України [Текст] : монографія / О. Г. Кірдіна. – Харків : УкрДАЗТ, 2011. – 312 с.
7. Шляхи удосконалення технологій мультимодальних швидкісних пасажирських перевезень [Текст] / Д. В. Ломотько, Д. Г. Воскобойников, М. С. Листопад, А. Д. Сірадчук // Зб. наук. праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна «Транспортні системи та технології перевезень». – Дніпро : ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2017. – Вип. 13. – С. 59-66.
8. Розроблення раціональної топології мережі швидкісних залізничних перевезень на основі методів колективного [Текст] / А. В. Прохорченко, Л. О. Пархоменко, А. І. Дубчак, Є. О. Сільченко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2012. – Вип. 133. – С. 39-45.

9. Development of the method for modeling the propagation of delays in non-cyclic train scheduling on the railroads with mixed traffic [Text] / T. Butko, A. Prokhorchenko, T. Golovko, G. Prokhorchenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. Kharkiv: PC «Technology center», 2018. Vol. № 3(91). P. 30-40.
10. Hyperloop в Україні: як ми продовжимо традиції Ілона Маска // ПрАТ «Телерадіокомпанія «Люкс», Телеканал новин «24» [Електронний ресурс]. – К. : Телеканал новин «24», 2005-2018. – Режим доступу : URL:https://24tv.ua/hyperloop_v_ukrayini_shho_tse_take_ta_yak_realizuyut_hyperloop_v_ukrayini_n930314 (дата звернення: 28.11.2017).
11. Модель оптимізації пасажирських перевезень у крупному транспортному вузлі при використанні рейкових автобусів [Текст] / О. В. Розсоха, Г. В. Шаповал, А. В. Боков, Р. О. Щербинін // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 169. – С. 157-165.
12. Продашук, С. М. Нова концепція тарифної політики для внутрішніх залізничних вантажних перевезень [Текст] / С. М. Продашук, Г. Є. Богомазова, Р. А. Пурій // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 164. – С. 161-169.
13. Струнные технологии Юницкого: [Веб-сайт] [Електронний ресурс]. – Минск : 1977-2018. – Режим доступу : URL:<http://www.yunitskiy.com/> (дата звернення 28.11.2017).
14. Improvement of technology for management of freight rolling stock on railway transport [Text] / T. Butko, S. Prodashchuk, G. Bogomazova, G. Shelekhan, M. Prodashchuk, R. Purii // Eastern-European journal of enterprise technologies. Kharkiv: PC «Technology center», 2017. Vol. № 3 (87). P. 4-11.
15. ukrstat.gov.ua: [Веб-сайт] [Електронний ресурс]. – К. : Держстат України, 1998-2018. – Режим доступу : URL:<http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 28.11.2017).
16. Временные ряды в STATISTICA. Спектральный (Фурье) анализ: [Блог] [Електронний ресурс]. – портал Статосфера. – Режим доступу : URL:<http://statosphere.ru/blog/113-timeser-fourier.html> (дата звернення 20.12.2017).
17. Tao, R. Cost-Benefit Analysis of High-Speed Rail Link between Hong Kong and Mainland China / Tao R., Liu S., Huang C., Tam C. // Journal of Engineering, Project and Production Management. 2011; 1(1):36-45. – Режим доступу : URL:<https://doaj.org/article/44534f6b4faa4205a2ba25fa8fec22f6/>

Продашук Світлана Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38(057)730-10-26. E-mail: sp7728@ukr.net.

Шаповал Ганна Василівна, канд. техн. наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-26. E-mail: ann.shapoval@ukr.net.

Тоцька Оксана Вікторівна, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС) Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38(099)395-52-55. E-mail: kharkov7487@gmail.com.

Марченко Олег Владиславович, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС) Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-26.

Белан Дмитро Олександрович, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС) Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-26.

Продашук Светлана Николаевна, канд. техн. наук, доцент кафедры управления грузовой и коммерческой работой Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: +38(057)730-10-26. E-mail: sp7728@ukr.net.

Шаповал Анна Васильевна, канд. техн. наук, доцент кафедры железнодорожных станций и узлов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-26. E-mail: ann.shapoval@ukr.net.
Тоцкая Оксана Викторовна, магистрант ИППК (Проект ТЕМПУС) Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: +38(099)395-52-55. E-mail: kharkov7487@gmail.com.

Марченко Олег Владиславович, магістрант ИППК (Проект ТЕМПУС) Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-26.

Белан Дмитрий Александрович, магістрант ИППК (Проект ТЕМПУС) Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-26.

Prodashchuk Svitlana Mykolaivna, PhD. Sc., assistant professor of Department of cargo and commercial work management Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-26. E-mail: sp7728@ukr.net.

Shapoval Ganna Vasilivna, PhD. Sc., assistant professor of railway stations and junctions Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-26. E-mail: ann.shapoval@ukr.net.

Totska Oksana Viktorivna, gs of ESIRAT (project TEMPUS) Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38(099)395-52-55. E-mail: kharkov7487@gmail.com.

Marchenko Oleh Vladyslavovych, gs of ESIRAT (project TEMPUS) Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-26.

Bielan Dmytro Oleksandrovych, gs of ESIRAT (project TEMPUS) Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-26.

Статтю прийнято 21.05.2018 р.

УДК 621.333.41

ЗАСТОСУВАННЯ КЛАСИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛОТКИ–ВОЛЬТЕРРИ ПРИ РОЗВ’ЯЗАННІ ЗАДАЧ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ У ЗАЛІЗНИЧНІЙ СФЕРІ ДІЯЛЬНОСТІ

Канд. техн. наук В. П. Нерубацький, магістрант Д. А. Гордієнко

ПРИМЕНЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛОТКИ–ВОЛЬТЕРРЫ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СФЕРЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Канд. техн. наук В. П. Нерубацкий, магістрант Д. А. Гордиенко

APPLICATION OF THE CLASSIC MODEL OF THE LOTKA–WOLTERRA AT THE REDUCTION OF THE PROBLEM OF RATIONAL USE OF RESOURCES IN RAILWAY SCOPE OF ACTIVITY

PhD, sen. lecturer V. P. Nerubatskyi, master D. A. Hordiienko

У статті розглянуто моделювання процесів, які описуються рівняннями Лотки–Вольтерри, за допомогою програмного продукту Matlab. Наведено результати моделювання системи, аналіз яких виконано за допомогою часових функцій та фазових траєкторій. Одержано залежності, які дають змогу спрогнозувати кількість гальмівних колодок, необхідних для забезпечення рухомого складу, і тим самим оптимізувати витрати в залізничній сфері діяльності.

Ключові слова: *модель, система, рівняння Лотки–Вольтерри, залежності, часові характеристики, фазовий портрет, оптимізація, ресурсозбереження, рухомий склад, колодки.*

В статье рассмотрено моделирование процессов, которые описываются уравнениями Лотки–Вольтерры, с помощью программного продукта Matlab. Приведены результаты моделирования системы, анализ которых выполнен с помощью временных функций и фазовых траекторий. Получены зависимости, позволяющие спрогнозировать количество тормозных колодок, необходимых для обеспечения подвижного состава, и тем самым оптимизировать расходы в железнодорожной сфере деятельности.

Ключевые слова: модель, система, уравнения Лотки–Вольтерры, зависимости, временные характеристики, фазовый портрет, оптимизация, ресурсосбережение, подвижной состав, колодки.

The article deals with the simulation of processes described by the Lotka-Volterra equations, which allows a comprehensive assessment of the dynamics of processes in various fields (biology, ecology, medicine, economics, social studies, history, radio physics and other sciences), to reach the equilibrium levels of the competing systems studied, theoretically predict and control the behavior of the main parameters of the model.

Among the most important issues facing today's modern railway enterprises in Ukraine is the search for ways to increase their efficiency. Under these conditions, issues of development and implementation of resource-saving technologies at railway enterprises are of particular importance.

For efficiency enterprises, cost optimization models are needed to ensure that economically sound decisions are made that increase financial performance and form the basis for effective work.

The article deals with the simulation of processes described by the Lotka-Volterra equations with the help of the Matlab software is considered. Based on the results presented in the simulation of the analyzed system, with the help of time and phase trajectories, it was investigated that Lotka-Volterra's mathematical model is a universal model that can be used to optimize a particular process.

The application of the classical mathematical model of Lotka-Volterra in the railway field of activity for cost optimization is carried out on the example of the process of distributing the estimated amount of brake pads needed to provide rolling stock, by creating an imitation model and obtaining characteristics that allow obtaining clear data on the process of distributing brake pads by locomotives and at the same time to avoid downtime, as well as excessive costs for the purchase of too many brake pads.

Keywords: model, system, Lotka - Volterra equations, dependencies, time characteristics, phase portrait, optimization, resource saving, rolling stock, pads.

Вступ. Серед найбільш важливих проблем, що стоять сьогодні перед сучасними підприємствами залізничного транспорту України, є пошук шляхів підвищення ефективності їх діяльності. За цих умов особливого значення набувають питання розроблення та впровадження на підприємствах залізничного транспорту ресурсозберігаючих технологій [1].

Для ефективної діяльності підприємств необхідні моделі оптимізації витрат [2], щоб забезпечити прийняття економічно обґрунтованих рішень, які

підвищують фінансову результативність і формують основу ефективної роботи [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми десятиліттями для імітаційного моделювання широко використовується модель Лотки–Вольтерри, яка дає змогу комплексно оцінити динаміку процесів у різних галузях (біології, екології, медицині, економіці, в соціальних дослідженнях, в історії, в радіофізиці та інших науках), вийти на рівноважні рівні досліджуваних конкуруючих систем, теоретично

спрогнозувати та керувати поведінкою основних параметрів моделі. Зважаючи на складність і нелінійність таких моделей, можуть бути використані різні сучасні комп'ютерні пакети.

Модель Лотки–Вольтерри було запропоновано в 1925–1927 рр. американським математиком, фізико-хіміком, статистом Альфредом Джеймсом Лоткою, який народився 1880 р. у м. Львів, та італійським математиком, фізиком Віто Вольтеррою [3]. Ця модель набула величезної популярності і іноді називається класичною моделлю взаємодії популяцій хижака та жертви.

У переважній більшості випадків даний клас динамічних моделей застосовується до ринку праці, в тому числі з урахуванням наявних на ньому потенційних працівників і вакантних робочих місць. У галузі економіки ця модель досить добре описує взаємодію двох конкуруючих підприємств, галузей, регіонів. Більш складним прикладом економічної взаємодії є система світового ринку. Замість підприємств можна розглядати держави. Суперництво може вестися, наприклад, за лідерство в економічній сфері, боротьбі за територію, рівень життя. Але, крім «мирної» конкуренції, існує і військова конкуренція, як, наприклад, гонка озброєнь [6].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження класичної математичної моделі Лотки–Вольтерри із застосуванням програмного продукту Matlab. Завдання дослідження полягають у застосуванні класичної математичної моделі Лотки–Вольтерри в залізничній сфері діяльності для оптимізації витрат на прикладі процесу розподілення розрахункової кількості гальмівних колодок, необхідних для забезпечення рухомого складу, шляхом створення імітаційної моделі та отримання характеристик, що дають змогу отримати чіткі дані про процес розподілення гальмівних колодок по локомотивах.

Основна частина дослідження. Іноді проста математична модель добре описує складну біологічну, екологічну або економічну систему. Прикладом цього служать довготривалі відносини між видами хижака та жертви в будь-якій екосистемі.

У роботі [4] проведено математичні розрахунки зростання популяції окремо взятого виду хижака (лисиця) та жертви (заєць). Дві популяції описуються класичними рівняннями Лотки–Вольтерри:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a \cdot x - b \cdot x \cdot y, & x(0); \\ \frac{dy}{dt} = -c \cdot y + d \cdot x \cdot y. & y(0). \end{cases} \quad (1)$$

де x – чисельність популяції «жертв»;

y – чисельність популяції «хижаків»;

a – коефіцієнт природного приросту популяції «жертв», «народжуваність», або швидкість зростання чисельності травоядних за відсутності хижаків;

b – коефіцієнт впливу популяції «хижаків» на чисельність популяції «жертв», («поїдання»), або швидкість, з якою зустрічі хижаків з жертвами видаляють травоядних з популяції;

c – коефіцієнт природної смертності популяції «хижаків», або швидкість скорочення чисельності м'ясоїдних під час відсутності травоядних;

d – коефіцієнт засвоєння біомаси «жертв» популяцією «хижаків», або швидкість, з якою зустрічі хижаків з жертвами дозволяють хижакам додавати чисельність своєї популяції;

$x(0)$ – початкова кількість «жертв»;

$y(0)$ – початкова кількість «хижаків»;

t – поточний час.

Отримані розрахунки в роботі [4] після комп'ютерного моделювання системи «хижак – жертва» засобами MATLAB/Simulink при деяких конкретних значеннях параметрів і початкових умовах показують, що межі щільності популяції

можна описати простими рівняннями, розв'язання яких дає характерну криву чисельності популяції, яка зростає експоненціально, поки вона невелика, а потім вирівнюється, коли досягає меж можливості екосистеми підтримувати її. Просте продовження цієї концепції дає змогу зрозуміти екосистему, в якій взаємодіють два види – хижак і жертва [5].

На прикладі такої моделі системи «хижак – жертва» проведено розрахунок кількості гальмівних колодок, необхідних для забезпечення рухомого складу.

Для розрахункових значень, необхідних для моделювання системи «колодки – локомотиви», було зроблено такі допущення [2]:

x – кількість гальмівних колодок;

y – кількість локомотивів, обладнаних колодками;

a – коефіцієнт постачання гальмівних колодок у депо, приймаємо $a = 4$;

b – коефіцієнт використання колодок на локомотивах, приймаємо $b = 3$;

c – коефіцієнт виходу з ладу локомотивів (старіння, недієздатність, неможливість відновлення після аварії), або швидкість скорочення чисельності локомотивів під час відсутності гальмівних колодок, приймаємо $c = 1$;

d – коефіцієнт задіяння локомотивів, обладнаних гальмівними колодками, приймаємо $d = 0,5$;

$x(0)$ – початкова кількість сотень гальмівних колодок, приймаємо $x(0) = 5$;

$y(0)$ – початкова кількість десятків локомотивів, приймаємо $y(0) = 2$;

t – час, протягом якого проводиться дослідження, приймаємо $t = 1$ рік, тобто 12 місяців.

Імітаційна модель системи «колодки – локомотиви» побудована за системою рівнянь (1) у програмному пакеті MATLAB [7] (рис. 1).

Часові функції [8] системи «колодки – локомотиви» отримані за період 12 місяців (рис. 2).

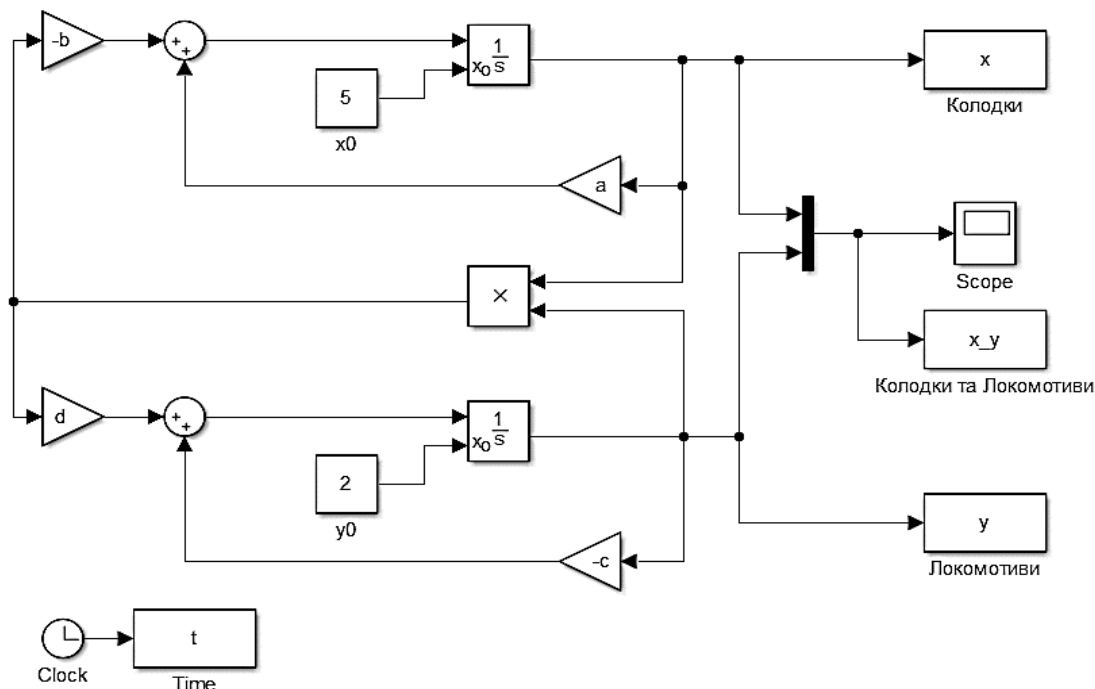


Рис. 1. Імітаційна модель системи «колодки – локомотиви»

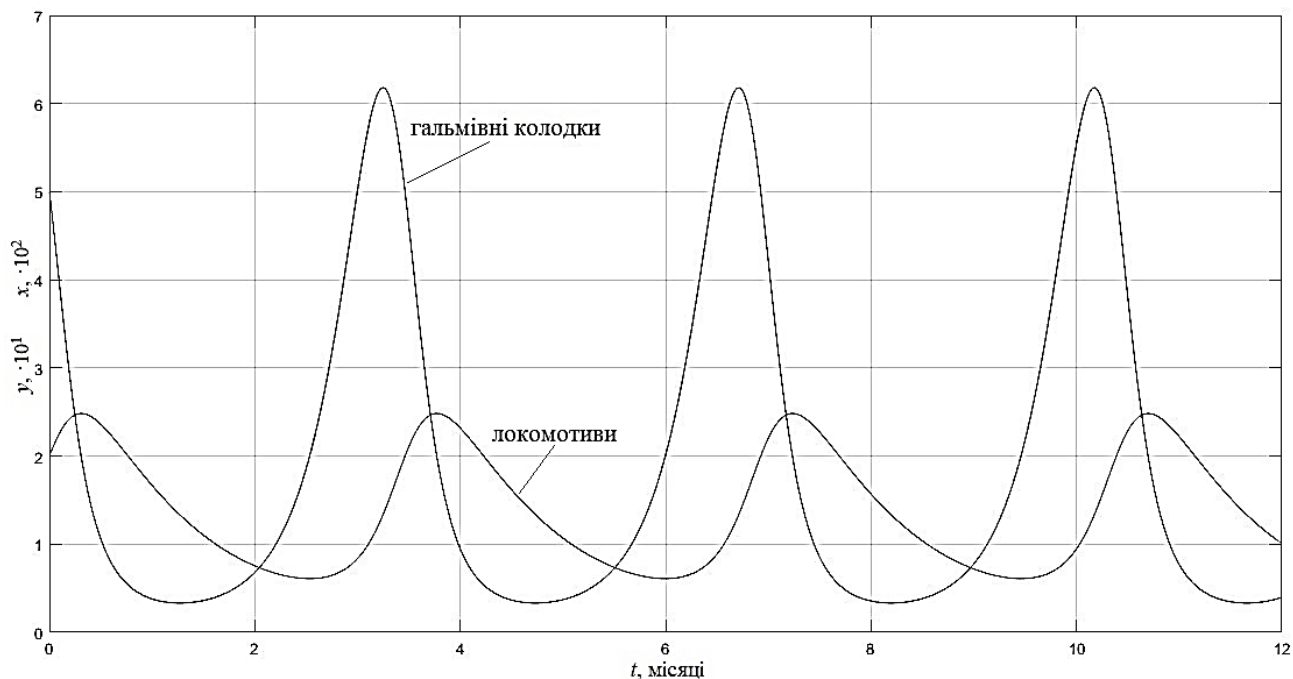


Рис. 2. Часові функції системи «колодки – локомотиви»

З часових характеристик спостерігаємо, що за перший місяць відбувається облаштування гальмівними колодками локомотивів. У цей час поступово зменшується кількість локомотивів, що потребують заміни колодок. Протягом наступних двох місяців необхідно зробити поповнення колодок приблизно до 600 штук, щоб забезпечити ними несправні локомотиви, кількість яких на третьому місяці починає різко зростати. Таким чином, два цикли повторюються протягом трьох місяців, тобто це період поповнення колодок і період, протягом якого відбувається заміна колодок на локомотивах.

Фазовий портрет системи «колодки – локомотиви» (рис. 3), являє собою концентрично замкнуту криву, за якою спостерігається залежність – при змінній кількості локомотивів, що потребують облаштування, змінюється необхідна кількість гальмівних колодок.

Дана модель є універсальною – за нею можна спрогнозувати кількість гальмівних

колодок, необхідну для забезпечення наявних у депо локомотивів.

Додамо у схему блок Step, який позначимо $-5y$, що означає зменшення кількості локомотивів на 5, наприклад, через чотири місяці, у зв'язку зі старінням, непридатністю, виходом з ладу або з інших причин. Другий блок Step позначимо $+10y$, тобто збільшення кількості локомотивів на 10, наприклад, через сім місяців (це може бути придбання нових або капітальний ремонт застарілих локомотивів) (рис. 4).

З імітаційної моделі отримуємо часові характеристики (рис. 5).

З характеристик спостерігаємо, як змінюється кількість гальмівних колодок, необхідних для облаштування, при зміні кількості локомотивів: через 4 місяці, коли зменшується кількість локомотивів на 5, потреба в колодках зменшується з 610 до 450; на сьомому місяці збільшується кількість локомотивів на 10, при цьому необхідно збільшити кількість колодок до 860.

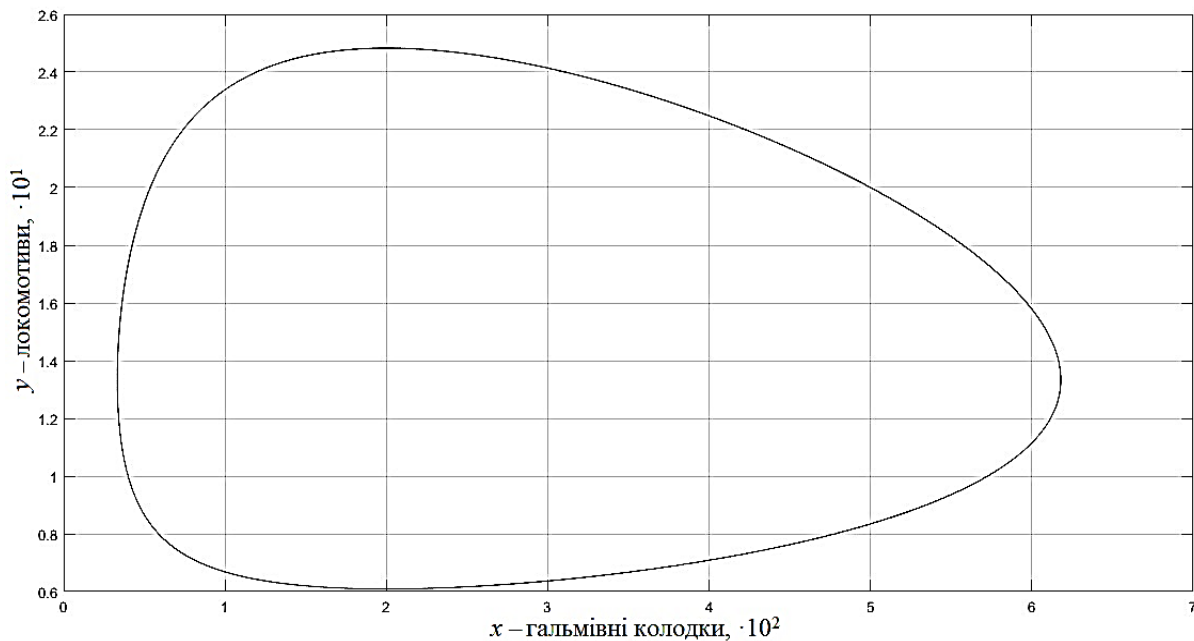


Рис. 3. Фазовий портрет системи «колодки – локомотиви»

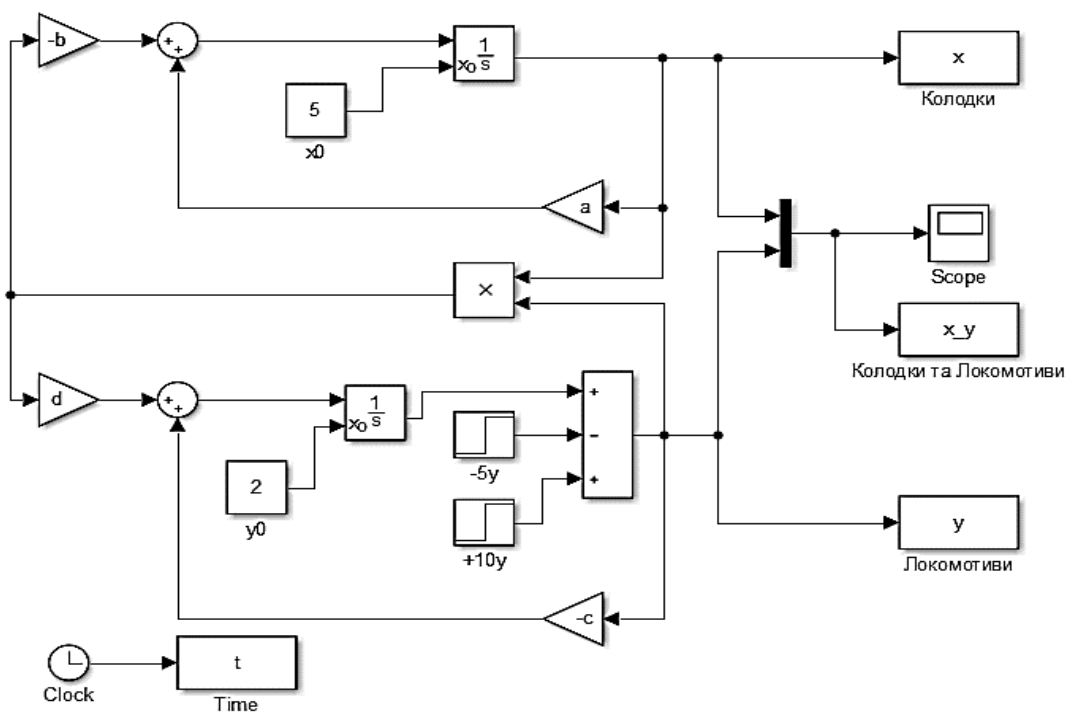


Рис. 4. Імітаційна модель системи «колодки – локомотиви» зі зміною кількості локомотивів упродовж року

Для відображення динаміки зміни кількості гальмівних колодок та зміни локомотивів було отримано фазовий

портрет системи «колодки – локомотиви» (рис. 6) та фазову траєкторію у тривимірному просторі (рис. 7).

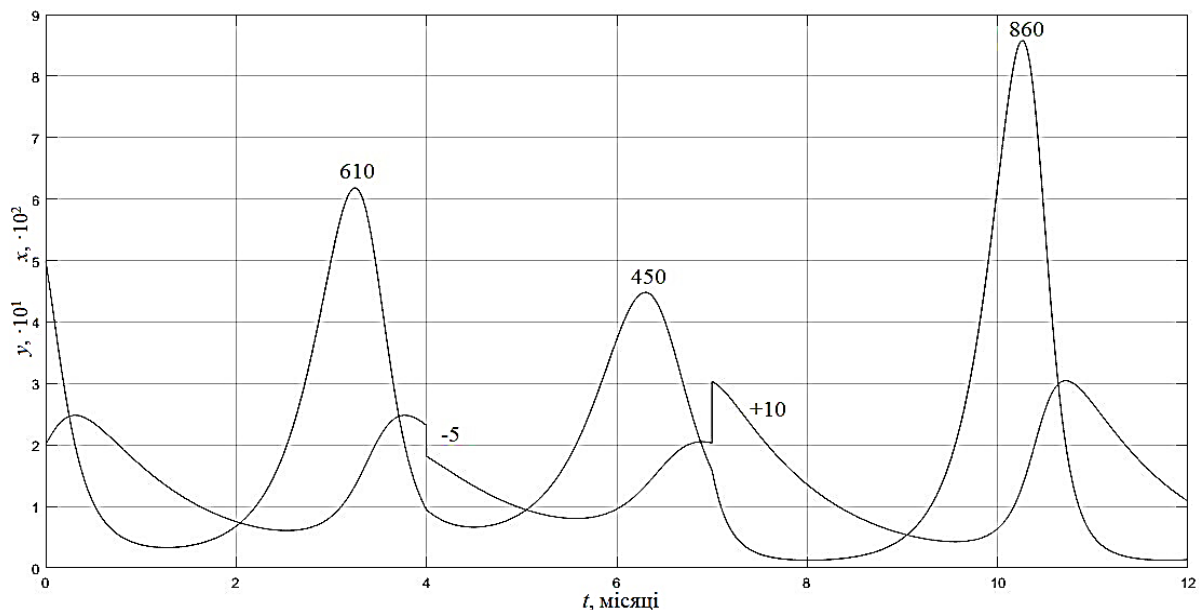


Рис. 5. Часові функції системи «колодки – локомотиви» зі зміною кількості локомотивів впродовж року

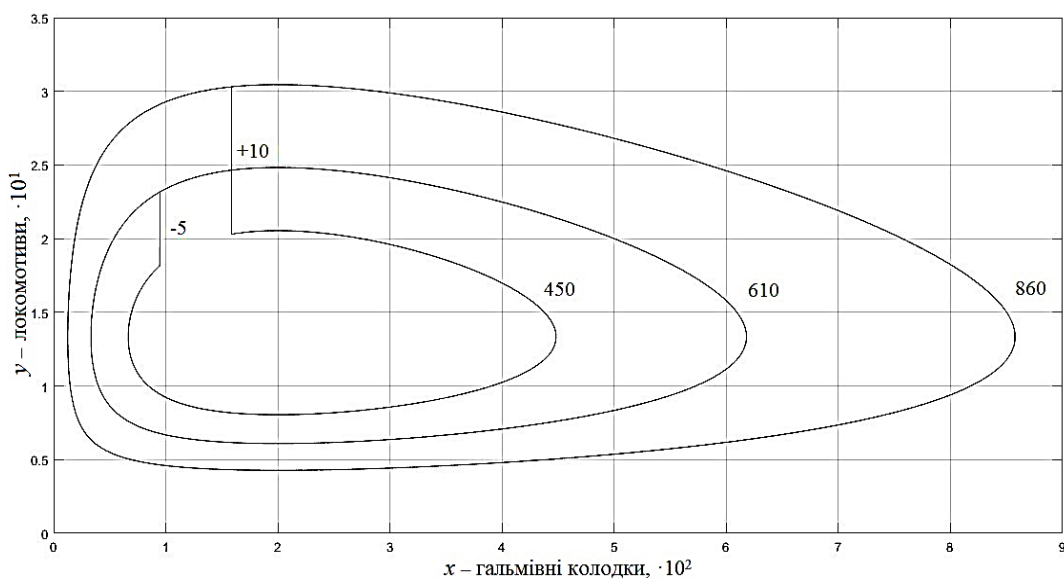


Рис. 6. Фазовий портрет системи «колодки – локомотиви»

Висновки. Таким чином, математична модель Лотки–Вольтерри являє собою універсальну модель, яку можна використовувати для оптимізації певного процесу, прикладом якого може бути розподілення гальмівних колодок по локомотивах, що і було досліджено в роботі.

З поданих характеристик системи «колодки – локомотиви» можна отримати чіткі дані про процес розподілення гальмівних колодок по локомотивах, спрогнозувати їх необхідну кількість з метою забезпечення ними рухомого складу і при цьому уникнути простоїв, а також зайвих витрат на придбання занадто великої кількості гальмівних колодок.

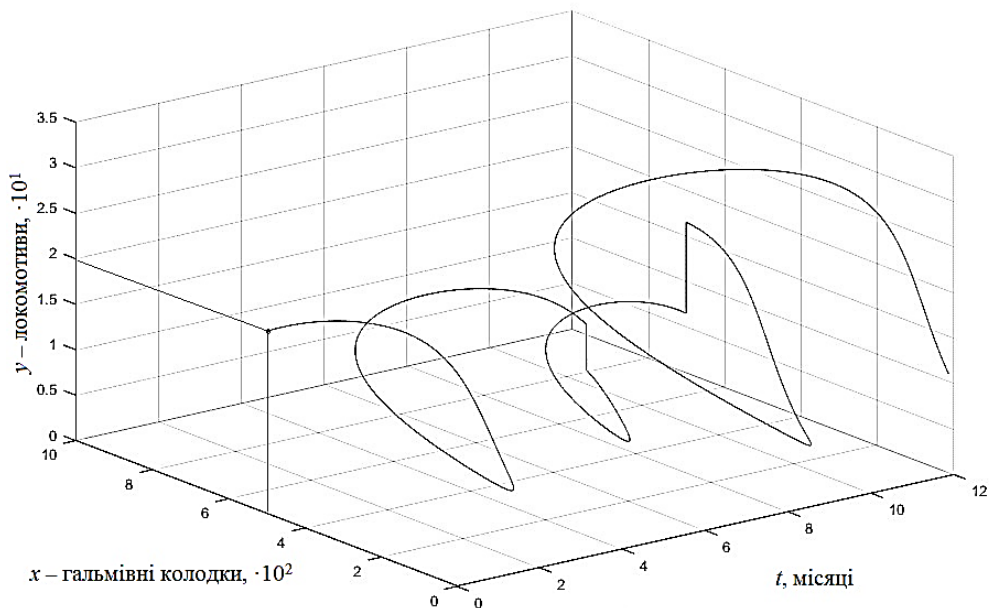


Рис. 7. Фазова траєкторія у тривимірному просторі

Список використаних джерел

1. Гудков, А. В. Ресурсосберегающие технологии и технические средства [Текст] / А. В. Гудков // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 4. – С. 72-78.
2. Губкевич, Т. В. Управление затратами в условиях ресурсосберегающих технологий [Текст] / Т. В. Губкевич // Железнодорожный транспорт. – 2000. – № 12. – С. 73-75.
3. Вольтерра, В. Математическая теория борьбы за существование [Текст] – М. : Наука, 1976. – 615 с.
4. Компьютерные технологии в задачах природы и общества [Текст] / Ю. Н. Соколов, Ю. А. Соколов, В. М. Илюшко // Комп'ютерні системи та інформаційні технології : зб. наук. праць. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Хар. авіац. ін-т», 2010. – С. 55-64.
5. Соколов, Ю. Н. Компьютерный анализ и проектирование систем управления. Ч. 1. Непрерывные системы [Текст] : учеб. пособие / Ю. Н. Соколов. – Харьков : Нац. аерокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 260 с.
6. Трубецков, Д. И. Феномен математической модели Лотки-Вольтерры и сходных с ней [Текст] / Д. И. Трубецков // Изв. вузов «ПНД». – Саратов, 2011. – № 2. – С. 69-88.
7. Щербаков, В. С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электромеханических систем в среде Matlab и Simulink [Текст] / В. С. Щербаков, А. А. Руппель, В. А. Глушец. – Омск, 2003. – 160 с.
8. Athanassopoulos, G., Hyndman, R. J., Kourentzes, N., Petropoulos, F. Forecasting with temporal hierarchies [Text] // European Journal of Operational Research. – 2017. – Volume 262, Issue 1. – P. 60-74.
9. Charnes, A., Cooper, W., Rhodes, E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units [Text] // European Journal of Operational Research. – 1978. – № 2. – P. 429-444.

Нерубацький Володимир Павлович, канд. техн. наук, старш. викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.
Тел.: (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua.

Гордієнко Денис Анатолійович, магістрант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76. E-mail: denis_gordienko@i.ua.

Нерубацький Володимир Павлович, канд. техн. наук, старш. преподаватель кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua.

Гордієнко Денис Анатолійович, магістрант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76. E-mail: denis_gordienko@i.ua.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD, senior lecturer of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport. Phone: (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua.

Hordiienko Denys Anatolievych, master of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of the Ukrainian State University of Railway Transport. Phone: (057) 730-10-76. E-mail: denis_gordienko@i.ua.

Статтю прийнято 23.05.2018 р.

УДК 656.027

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ШВИДКІСНОГО РУХУ У ВЕЛИКИХ МІСТАХ НА ОСНОВІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОПИТУ НА ПЕРЕВЕЗЕННЯ

Кандидати техн. наук В. М. Запара, Я. В. Запара, магістранти В. В. Ільєнко, Є. О. Семенюк, В. В. Червяков

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ В КРУПНЫХ ГОРОДАХ НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПРОСА НА ПЕРЕВОЗКИ

Кандидаты техн. наук В. М. Запара, Я. В. Запара, магистранты В. В. Ильенко, Е. А. Семенюк, В. В. Червяков

MODEL OF FORMATION OF THE RAILWAY SYSTEM IN THE LARGE CITIES ON THE BASIS OF DETERMINING THE DEMAND FOR TRANSPORTATION

Ph.D. (Candidates of Techn. Scien.) V. Zapara, Y. Zapara, master students V. Pienko, Y. Semenyuk, V. Chervyakov

Запропоновано підходи до визначення попиту на швидкісні залізничні пасажирські перевезення у великих містах, розроблено теоретичні основи реалізації інтервальної концепції моделювання попиту на переміщення. У подальшому подані дослідження можуть бути використані для визначення доцільності функціонування швидкісних пасажирських перевезень у великих містах, компонування составів та складання розкладу руху швидкісних поїздів, побудови та реконструкції залізничної інфраструктури.

***Ключові слова:** попит, швидкісний рух, залізничні перевезення, великі міста, пасажиропотік, інтервальна концепція.*

Предложены подходы для определения спроса на скоростные железнодорожные пассажирские перевозки в крупных городах, разработаны теоретические основы реализации интервальной концепции моделирования спроса на передвижения. В дальнейшем представленные исследования могут быть использованы для определения целесообразности функционирования скоростных перевозок в крупных городах, компоновки составов и составления расписания движения скоростных поездов, строительства и реконструкции железнодорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: *спрос, скоростное движение, железнодорожные перевозки, крупные города, пассажиропоток, интервальная концепция.*

The offered approaches to the definition of demand for high-speed rail passenger transportation in large cities, the theoretical bases of realization of the interval concept of modeling of demand for movement are developed. The value of capacity of transport areas is proposed to be determined based on the results of surveys of passenger traffic on high-speed rail transport. This is due to the fact that these characteristics of the transport process are the most objective and stable. The calculation of capacity of transport areas is carried out in two main stages. At the first, the capacity for departure and arrival within the higher transport areas is determined. At the second stage, the values of the capacities of the higher transport areas are locally allocated between the transport areas within their borders. The main parameters for which the distribution is carried out is the population density and density of workplaces, taking into account the size of the transport areas. The basis for local distribution of capacities on large areas of urban territory, for which it is impossible to provide a large degree of detail of transport characteristics, may be the characteristics of resettlement and employment of the population. A prerequisite for modeling a passenger correspondence matrix is the implementation of a number of constraints in which the determination of demand for passenger high-speed rail services can be considered correct. The criteria for optimization are the amount of transport work and the average range of passengers.

The conducted research is the basis for developing a model of job density and building an imitation model for the formation of demand conditions for high-speed rail passenger traffic in large cities.

Subsequent studies may be used to determine the expediency of high-speed passenger transportation in large cities, layout of compilations and scheduling of high-speed trains, construction and reconstruction of railway infrastructure.

Keywords: *demand, high-speed traffic, rail transportation, large cities, passenger traffic, interval concept.*

Вступ. В умовах розвитку швидкісних залізничних перевезень визначення попиту пасажирів на їх користування є ключовим аспектом формування та економічного обґрунтування появи швидкісних ліній, побудови та реконструкції необхідної інфраструктури та організації руху швидкісних поїздів.

На сьогодні існує декілька перспективних проектів розвитку швидкісного залізничного руху в Україні, серед них швидкісна лінія у місті Київ, від станції Київ-Пасажирський до аеропорту

Бориспіль, що дасть змогу зменшити навантаження на шляхову мережу, скоротити час перебування пасажирів у дорозі за цим напрямком та підвищити комфорт переміщення. Під швидкісним залізничним рухом у великих містах будемо розуміти курсування швидкісних поїздів між транспортними районами міста для задоволення потреб пасажирів у переміщенні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвитку швидкісного залізничного руху, зокрема його функціонуванню у

великих містах, присвяченні відомі праці Бараша Ю. С., Бутько Т. В., Луїної Т. А., Момота А. В., Торопова Б. І., Огара О. М. тощо [1-9].

В [1] формалізовано процес організації пасажиропотоків при пересадках на основі мікрорівневої моделі організації потоків пасажирів з використанням мультиагентних методів, який не в повній мірі враховує попит пасажирів на швидкісні поїзди. У роботі [2] при здійсненні процесу пересадки на вокзалі за варіантом «пасажирський поїзд – міський транспорт» не враховано окремо швидкісний залізничний рух. В [3] запропоновано через визначення розподілу величини щільності потоку пасажирів встановлювати значення найбільш імовірної щільності переміщення потоків тими чи іншими пішохідними комунікаціями і в подальшому використовувати знайдені параметри при розрахунках необхідної пропускної спроможності, але запропонований метод складний для збору та обробки статистичних параметрів пасажиропотоків. У [4] визначено оптимальний графік побудови обігу швидкісних поїздів у залізничних вузлах, що дає можливість вивільнення составів швидкісних поїздів для подальшого їх раціонального використання на інших полігонах залізниць для задоволення потреб пасажирів, але не зазначено, як визначити потреби пасажирів у користуванні швидкісними поїздами. В працях [5–6, 8] запропоновано підхід до визначення раціональних швидкостей руху пасажирських поїздів та раціональних зон курсування, в якому не враховано місткість транспортних районів великих міст. У [7] при визначенні ефективності проекту швидкісного руху пасажирських поїздів не досліджувалися результати обстежень пасажиропотоків на швидкісному залізничному транспорті для врахування потреб жителів міст як потенційних користувачів швидкісними поїздами. В праці [9] визначено раціональне місце

розташування пасажирської станції для обслуговування високошвидкісних поїздів у залізничному вузлі з урахуванням множини факторів, зокрема і попиту жителів районів міста, але не визначено шляхів, як реалізувати будівництво зазначеної станції у щільній місцевій забудові. В цілому слід зазначити, що при технологічно-економічному обґрунтуванні конкуруючих варіантів перевезення на конкретному напрямі для впровадження швидкісного руху вітчизняні вчені не в повній мірі враховують фактори формування попиту на послуги швидкісного залізничного транспорту, наприклад [10]. В [11] дослідження зорієнтовані на планування роботи високошвидкісних перевезень без урахування щільності населення та робочих місць транспортних районів великих міст. У [12] здійснено поглиблене дослідження важливості різних підсистем у високошвидкісній мережі пасажирських перевезень і доведено, що комплексна теорія мережі може допомогти оптимізувати високошвидкісні мережі пасажирських перевезень і покращити ефективність трафіка. Не зрозуміло, однак, як ці дослідження будуть враховувати попит на переміщення пасажирів між містами та районами міст.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є удосконалення залізничного швидкісного руху у великих містах. Завданням дослідження є розроблення підходів для визначення попиту на швидкісні залізничні пасажирські перевезення у великих містах на основі покрокової зміни величини пасажирської кореспонденції в матриці.

Основна частина дослідження. Матриця пасажирських кореспонденцій розглядається як результат випадкового розподілу місткостей транспортних районів між осередками матриці.

$$H = f(D_i, A_j), \quad (1)$$

де H – матриця пасажирських кореспонденцій;

D_i – місткість i -го транспортного району за відправленням у період «пік» (вечірні години, вихідні та святкові дні), пас/доб;

A_j – місткість j -го транспортного району за прибуттям у період «пік», пас/доб.

Значення місткостей транспортних районів запропоновано визначати на основі результатів обстежень пасажиропотоків на швидкісному залізничному транспорті. Це зумовлено тим, що ці характеристики транспортного процесу є найбільш об'єктивними та стабільними. Розрахунок місткостей транспортних районів виконується двома основними етапами. На першому визначаються місткості за відправленням і прибуттям у межах вищих транспортних районів (тобто зосереджених пунктів відправлення-прибуття пасажирів швидкісного залізничного пасажирського руху, що локально інтегрують транспортні райони, які розташовані в його межах, відповідно до щільності населення та щільності робочих місць) за період «пік»:

$$DG = PD + MD - T, \quad (2)$$

$$AG = PA + MA - T, \quad (3)$$

де DG – місткість вищого транспортного району за відправленням, пас/доб;

PD, PA – відповідно, пасажиропотік, що відправляється та прибуває в вищий транспортний район швидкісним залізничним транспортом, пас/доб;

MD – пасажиропотік, що відправляється з вищого транспортного району швидкісним залізничним транспортом, пас/доб;

T – транзитний пасажиропотік, пас/доб;

AG – місткість вищого транспортного району за прибуттям, пас/доб;

MA – пасажиропотік, що прибуває до вищого транспортного району швидкісним залізничним транспортом, пас/доб.

Для виконання умови збалансованості місткостей вищих транспортних районів, тобто $\sum_{V=1}^U DG_V = \sum_{S=1}^U AG_S$ (U – кількість вищих транспортних районів), виконано корегування значень AG_S відносно DG_V . Це обумовлено тим, що обсяги відправлень зі станцій швидкісного залізничного транспорту є достовірною інформацією завдяки автоматичній фіксації придбання квитків пасажирями при здійсненні поїздки.

На другому етапі значення місткостей вищих транспортних районів локально розподіляються між транспортними районами, що розташовані в їх межах. За основні параметри, відносно яких виконується розподілення, обрано щільність населення та щільність робочих місць з урахуванням розмірів транспортних районів:

$$D_i = DG \cdot D_i^T / \sum_{i=1}^Y D_i^T, \quad (4)$$

$$A_j = AG \cdot A_j^T / \sum_{j=1}^Y A_j^T, \quad (5)$$

де D_i^T, A_j^T – відповідно значення місткостей транспортних районів за відправленням і прибуттям, які визначено на основі щільності населення та робочих місць, пас/доб;

Y – кількість транспортних районів, що розташовані у вищому транспортному районі, од.

Необхідною умовою моделювання матриці пасажирських кореспонденцій є виконання низки обмежень, при яких визначення попиту на послуги пасажирського швидкісного залізничного транспорту можна буде вважати коректним. Критеріями оптимізації є величина транспортної роботи та середня дальність переміщення пасажирів.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^r h_{ij} = D_i, \\ \sum_{i=1}^r h_{ij} = A_j, \\ \sum_{i=1}^r D_i = \sum_{j=1}^r A_j = Q, \\ h_{ij}, D_i, A_j \geq 0, \end{array} \right. \quad (6)$$

де h_{ij} – величина кореспонденції між i -им та j -им транспортними районами, пас;

Q – обсяг перевезень пасажирів швидкісним залізничним транспортом за період «пик», пас/доб;

r – кількість транспортних районів у місті, од.

Згідно з інтервальною концепцією, попит на послуги швидкісного залізничного транспорту необхідно описувати певною множиною матриць кореспонденцій. При цьому необхідно враховувати, що зміна значення кореспонденції лише в одному осередку матриці призводить до зміни всього її стану. Кожен такий стан матриці H_i оцінюється величиною транспортної роботи швидкісного залізничного транспорту b_i . Пошук екстремуму цієї величини на мінімум b_{\min} та максимум b_{\max} дає змогу отримати граничні стани попиту на переміщення населення великих міст. Таким чином, величина транспортної роботи $b_i \in [b_{\min}; b_{\max}]$, з огляду на те, що $b_{\min} = H_{\min}$ та $b_{\max} = H_{\max}$, отримуємо $H_i \in [H_{\min}; H_{\max}]$. З цього випливає, що кожен стан попиту на переміщення H_i належить певній множині його можливих станів Ω , яка характеризується значною потужністю, оскільки інтервал $[b_{\min}; b_{\max}]$ є надто великим. Граничні та наближені до них стани попиту є малоімовірними у зв'язку з тим, що, наприклад, у разі

$H_{\min} = b_{\min}$ більшість мешканців міста будуть закінчувати свої переміщення в тих самих транспортних районах, в яких вони розпочинали свій рух, чого насправді у великих містах не відбувається, це пояснюється розташуванням вокзалів на території міста. Отже, пошук найбільш імовірних варіантів матриці кореспонденцій дасть можливість скоротити ширину інтервалу можливих станів попиту на переміщення без втрати точності оцінки функціонування маршрутної системи міста. Для цього необхідно дослідити характер зміни величини транспортної роботи швидкісного залізничного транспорту при різних станах попиту на переміщення шляхом покрової зміни матриці пасажирських кореспонденцій.

У рамках такої задачі перетворення матриці кореспонденцій необхідно розпочинати з нейтрального її стану, при якому величини кореспонденцій не залежать від характеристик переміщення. Такий стан матриці приймається як «стартовий», і з нього починається моделювання інших можливих варіантів попиту. Як вихідну інформацію для розрахунку цього стану доцільно використовувати лише значення місткостей транспортних районів за відправленням та прибуттям, оскільки вони відображають результат виконання переміщень пасажирів між певними містами і територіями міста. На основі цих даних з урахуванням загального обсягу перевезень швидкісного залізничного транспорту за період «пик» можна визначити ймовірність відправлення та прибуття пасажирів у транспортні райони міст:

$$p_i = D_i / Q, \quad (7)$$

$$p_j = A_j / Q, \quad (8)$$

де p_i – ймовірність відправлення пасажирів з i -го транспортного району;

p_j – ймовірність прибуття пасажирів у j -й транспортний район.

У свою чергу величина кореспонденції в матриці при її

«стартовому» стані визначається за формулою:

$$h_{ij} = Q \cdot p_i \cdot p_j \tag{9}$$

Це пояснюється тим, що

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^r h_{ij} &= \sum_{i=1}^r Q \cdot p_i \cdot p_j = Q \cdot p_j \cdot \sum_{i=1}^r p_i = Q \cdot p_j \cdot \sum_{i=1}^r \frac{D_i}{Q} = \\ &= Q \cdot p_j \cdot \frac{1}{Q} \cdot \sum_{i=1}^r D_i = p_j \cdot \sum_{i=1}^r D_i = p_j \cdot Q = A_j, \end{aligned} \tag{10}$$

і гарантується тим, що

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r p_{ij} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r p_i \cdot p_j = 1, \tag{11}$$

де p_{ij} – ймовірність виконання переміщення з i -го в j -й транспортний район.

Великою перевагою такого методу моделювання матриці пасажирських кореспонденцій є виконання умови (6) без проведення ітераційних розрахунків та

калібрування отриманих результатів. Наявність «стартового» стану матриці кореспонденцій дає змогу розпочати пошук інших станів попиту, кожен з яких отримується шляхом циклічного перетворення матриці за аналогією до методів розв'язання транспортної задачі лінійного програмування (рис. 1). Слід зазначити, що перехід матриці з одного стану в інший є результатом виконання декількох циклів, кількість яких для кожного переходу є випадковою величиною.

Номер ТР	1	2	...	j	...	r	D
1	$h_{11} - \min(h_{11}; h_{22}; h_{ij})$	h_{12}	...	$h_{1j} + \min(h_{11}; h_{22}; h_{ij})$	...	h_{1r}	D_1
2	$h_{21} + \min(h_{11}; h_{22}; h_{ij})$	$h_{22} - \min(h_{11}; h_{22}; h_{ij})$	...	h_{2j}	...	h_{2r}	D_1
...
i	h_{i1}	$h_{i2} + \min(h_{11}; h_{22}; h_{ij})$	...	$h_{ij} - \min(h_{11}; h_{22}; h_{ij})$	...	h_{ir}	D_i
...
r	h_{r1}	h_{r2}	...	h_{rj}	...	h_{rr}	D_r
A	A_1	A_2	...	A_j	...	A_r	...

Рис. 1. Варіант перетворення стану матриці кореспонденцій

У результаті виконання кожного перетворення матриці в загальному випадку відбувається зміна величини

транспортної роботи (ТР) та середньої дальності переміщення, через що ці показники прийнято за оцінні для кожного

стану попиту. Таким чином, процес зміни середньої дальності переміщення пасажирів у результаті виконання q -ої кількості циклів у t -му переході пропонується описувати таким чином:

$$l_1 = l_0 + \frac{\sum_{z=1}^q \Delta l_z \cdot \Delta h_z}{Q}, \quad (12)$$

при $\Delta l_z = \sum_{f=1}^d (-1)^f \cdot l_f,$ (13)

де l_0 – середня дальність переміщення пасажирів при «стартовому» стані матриці пасажирських кореспонденцій, км;

Δl_z – зміна відстані переміщення при реалізації одного циклу, км;

Δh_z – кореспонденції, що переміщуються циклом (випадкова величина), пас.;

q – кількість циклів в одному переході (випадкова величина), од.;

l_f – значення відстані переміщення для f -ої кореспонденції в циклі, км;

d – кількість осередків, що задіяні в циклі, $d > 4$, од.

Середня дальність переміщення при «стартовому» стані матриці кореспонденцій l_0 визначається виходячи з величини транспортної роботи при цьому стані попиту та обсягу перевезень

$$C_B = \frac{\prod_{i=0}^{k-1} (m-i) \cdot (n-i)}{k} \cdot (1 - (1 - (1 - p_0)^k)), \text{ якщо } m \neq n; m, n, k \geq 0, \quad (16)$$

де C_B – кількість можливих циклів у матриці пасажирської кореспонденції, од.;

m, n – відповідно кількість стовпців і рядків у матриці, од.;

k – кількість осередків з непарними номерами, що задіяні в циклі, $k = d/2$, од.;

швидкісним залізничним транспортом за період «пік».

У свою чергу зміна величини транспортної роботи в результаті виконання q -ї кількості циклів у t -му переході має вигляд:

$$b_t = b_0 + \sum_{z=1}^q \Delta h_z \cdot l_z \cdot \Delta h_z \in [0; \Delta h_{z \max}], \quad (14)$$

$$\Delta h_{z \max} = \min(h_1, h_3, \dots, h_{d-1}), \quad (15)$$

де b_0 – величина транспортної роботи при «стартовому» стані попиту, пас.км;

h_z – значення кореспонденцій у непарних осередках, задіяних у циклі, пас.

Визначення характеру зміни величини транспортної роботи при різних станах попиту на переміщення потребує оцінювання можливої кількості цих станів. Методом індукції на основі базових залежностей комбінаторного аналізу і теорії ймовірностей побудовано математичну модель, що дає змогу, виходячи з розмірності матриці розрахувати кількість можливих циклів у ній. Модель ураховує ймовірність появи нульової кореспонденції в непарних осередках, що задіяні в циклі. Для випадку, коли кількість районів відправлень не збігається з кількістю районів прибуття, отримано такий вигляд моделі:

p_0 – ймовірність появи в матриці кореспонденції з нульовим значенням.

Величина Δl_z є результатом складання значної кількості випадкових величин l_f , які належать до матриці відстаней L . Ці величини є нормально

розподіленими, що підтверджено результатами досліджень. На основі цього висунуто гіпотезу, що величина транспортної роботи швидкісного залізничного транспорту розподілена за нормальним законом. Виходячи з того, що математичне сподівання величини L дорівнює $M(L) = \bar{l}$, отримуємо:

$$M(\Delta l_z) = M \sum_{m=1}^d (l_{pm} - l_{nm}) = 0, \quad (17)$$

де l_{pm}, l_{nm} – відповідно відстані переміщення в осередках з парними та непарними номерами, км.

На основі аналітичних залежностей отримуємо, що величина транспортної роботи розподілена за нормальним законом з математичним сподіванням:

$$M(b_i) = b_0 + \sum_{z=1}^p \Delta h_z \cdot 0 = b_0. \quad (18)$$

Гіпотеза про розподіл величини транспортної роботи швидкісного залізничного транспорту за нормальним законом потребує підтвердження результатами експериментальних досліджень, що стане основою для побудови імітаційної моделі формування станів попиту процесу пересування пасажирів швидкісним залізничним

пасажирським транспортом у великих містах.

Висновки. Запропоновано підходи для визначення попиту на швидкісні пасажирські залізничні перевезення у великих містах. Розроблено теоретичні основи визначення місткостей транспортних районів міст і реалізації інтервальної концепції моделювання попиту на переміщення.

Визначення місткостей транспортних районів міст за відправленням та прибуттям доцільно виконувати на основі даних про пасажиропотоки на швидкісному залізничному транспорті як найбільш об'єктивних та стабільних характеристик транспортного процесу. Основою для локального розподілення місткостей на великих ділянках міської території, для яких неможливий великий ступінь деталізації транспортних характеристик, можуть виступати характеристики розселення та зайнятості населення.

У подальшому визначення попиту на послуги залізничних швидкісних перевезень можуть бути використані для визначення доцільності функціонування швидкісних пасажирських перевезень між певними районами міст; компонування составів та побудови розкладу руху швидкісних поїздів; побудови нової та реконструкції існуючої інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Бутько, Т. В. Формування моделі організації пасажиропотоків на залізничному пересадочному комплексі [Текст] / Т. В. Бутько, А. В. Єна, Т. Д. Дідур // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 164. – С. 37–43.
2. 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.
3. Торопов, Б. І. Розвиток пасажирських комплексів на основі закономірностей формування пасажиропотоків [Текст] : автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.22.01 / Торопов Б. І.; Київський ін-т залізнич. трансп. – К., 2001. – 21 с.

4. Запара, Я. В. Оптимізація побудови графіка обігу швидкісних пасажирських поїздів у залізничних вузлах [Текст] / Я. В. Запара, І. В. Майоров, О. В. Петрів // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 173. – С.5-12.
5. Момот, А. В. Аналіз наукових підходів щодо обґрунтування економічної доцільності будівництва в Україні високошвидкісних магістралей [Текст] / А. В. Момот // Матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми економіки на залізничному транспорті ЕКУЖТ-2012», 11-13 жовтня, м. Судак. – К. : РВЦ ДЕДУТ, 2012. – С. 275-276.
6. Момот, А. В. Методичний підхід до визначення раціональних швидкостей руху пасажирських поїздів та раціональних зон курсування [Текст] / А. В. Момот // Проблеми економіки транспорту: зб. наук. праць ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 5. – С.80-89.
7. Лунина, Т. А. Совершенствование методики оценки эффективности вариантов проекта организации скоростного движения пассажирских поездов [Текст] / Т. А. Лунина, Е. В. Климова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 1. – С.165-168.
8. Бараш, Ю. С. Методичний підхід щодо визначення оптимальних зон курсування різних видів пасажирських поїздів [Текст] / Ю. С. Бараш, О. О. Матусевич // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2015. – Вип. 50. – С.169-176.
9. Визначення раціонального місця розташування пасажирської станції для обслуговування високошвидкісних поїздів у крупному залізничному вузлі [Текст] / О. М. Огар, М. С. Кужавський, Є. М. Кузнецов, М. В. Наумов // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 173. – С.42-51.
10. Аналіз перспектив впровадження високошвидкісного руху в Україні [Текст] / О. В. Лаврухін, О. О. Шапатіна, С. В. Газаєв [та ін.] // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 163. – С.4-10.
11. Espinosa-Aranda J. High-speed railway scheduling based on user preferences [Text] / J. Espinosa-Aranda [et. al.] // European Journal of Operational Research. – 2015, November. – Vol. 246. – P. 772-786.
12. Zhang, X. Study on node importance evaluation of the high-speed passenger traffic complex network based on the Structural Hole Theory [Text] / X. Zhang, B. Chen // De Gruyter Open. – 2017. – Vol. 15. – P. 1-11.

Запара Віктор Мефодійович, канд. техн. наук, професор кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-85.
E-mail: v.zapara@gmail.com.

Запара Ярослав Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-85.
E-mail: y.zapara@gmail.com.

Ільєнко Володимир Володимирович, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС IV) Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: i.v.v.1988@ukr.net.

Семенюк Євгенія Олександрівна, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС IV) Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: semenyuk.nfr@gmail.com.

Червяков Віталій Вікторович, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС IV) Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: raхан.8416@gmail.com

Запара Віктор Мефодієвич, канд. техн. наук, професор кафедри управління грузовою і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. : (057) 730-10-85.
E-mail: v.zapara@gmail.com.

Запара Ярослав Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління грузовою і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. : (057) 730-10-85.
E-mail: y.zapara@gmail.com.

Ильенко Владимир Владимирович, магистрант ИППК (Проект ТЕМПУС IV) Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. E-mail: i.v.v.1988@ukr.net.

Семенюк Евгения Александровна, магистрант ИППК (Проект ТЕМПУС IV) Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. E-mail: semenyuk.nfr@gmail.com.

Червяков Виталий Викторович, магистрант ИППК (Проект ТЕМПУС IV) Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. E-mail: paxan.8416@gmail.com.

Zapara Victor, Ph.D., professor of management of freight and commercial work, Faculty of Railway Operation and Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-85. E-mail: v.zapara@gmail.com.

Zapara Yaroslav, Ph.D., lecturer of management of freight and commercial work, Faculty of Railway Operation and Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-85. E-mail: y.zapara@gmail.com.

Iliencko Volodymyr, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: i.v.v.1988@ukr.net.

Semeniuk Yevheniia, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: semenyuk.nfr@gmail.com.

Chervyakov Vitali, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: paxan.8416@gmail.com.

Статтю прийнято 29.05.2018 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 625.151

**ВСТАНОВЛЕННЯ НОРМАТИВІВ СТРОКІВ СЛУЖБИ СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ
ДЛЯ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КИЇВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ**

Кандидати техн. наук В. Д. Бойко, В. М. Молчанов, інж. О. О. Сорока

**УСТАНОВЛЕНИЕ НОРМАТИВОВ СРОКОВ СЛУЖБЫ СТРЕЛОЧНЫХ
ПЕРЕВОДОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КИЕВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА**

Кандидаты техн. наук В. Д. Бойко, В. Н. Молчанов, инж. О. А. Сорока

**ESTABLISHMENT OF STANDARDS SWITCH'S WEAR-RESISTANCE FOR
OPERATING CONDITIONS IN KIEV UNDERGROUND**

Phd. tehn. V. D. Boiko, V. M. Molchanov, engineer, pg. O. O. Soroka

Подано результати комплексних експлуатаційних досліджень щодо встановлення нормативних строків служби стрілочних переводів типу Р65 і Р50 на основі характеристик зносостійкості основних металевих елементів переводів для умов експлуатації в головних коліях Київського метрополітену. Результати проведених досліджень дали змогу, на основі прогнозування зносу металевих елементів стрілочних переводів, обґрунтовано встановити нормативи строків служби переводів для різного конструктивного оформлення та різних умов експлуатації метрополітену.

Ключові слова: стрілочні переводи, стрілка, гостряк, хрестовина, знос, умови експлуатації, нормативні строки служби.

Представлены результаты комплексных эксплуатационных исследований по установлению нормативных сроков службы стрелочных переводов типа Р65 и Р50 на основе характеристик износоустойчивости основных металлических элементов переводов для условий эксплуатации в главных путях Киевского метрополитена. Результаты проведенных исследований разрешили обосновано установить нормативы сроков службы стрелочных переводов для разного конструктивного исполнения и разных условий эксплуатации метрополитена.

Ключевые слова: стрелочные переведы, стрелка, остряк, крестовина, износ, условия эксплуатации, нормативные сроки службы.

This research is devoted to the solution of a difficult task which concerns justification and establishment of rational rationing of size of the missed tonnage on metal elements of railroad switches depending on wear size, defines operability of separate elements and a design in general. The specified norm directly has functional communication with complex characteristics which consider design features (type, brand, a type of the subrail basis) and operational conditions on sites of a way (freight density, the missed tonnage, speed of the movement, axial loadings, the primary direction of train service, etc.).

As railroad switches work in more difficult service conditions, have more difficult constructive registration, the increased power interaction, the wear of their separate elements has differences in the course of formation from a usual track and demands individual consideration. The worn most out by elements of railroad switches is crosspieces and shooters depend on their state admissible speeds of train service. Therefore the conducted researches provided establishment of standard service life of the specified elements.

Results of complex operational researches on establishment of standard service life of R65 and R50 railroad switches on the basis of characteristics of wear resistance of the basic metal elements of the translations for service conditions on the main ways of the Kiev subway are presented.

Theoretical calculations the special technique which is developed by professor E.I. Danilenko has been assumed as a basis, it has well proved for establishment of the corresponding standards on the main railroads.

In the specified technique service conditions of a design are considered by the complex characteristic of power loading of a way, considers not only the major factors influencing wear, but also additional parameters: sizes and a range of the passed wheel loadings, diameters of wheels of the rolling stock, size of additional dynamic forces from roughnesses on the surface of driving of a rail and time of action of dynamic force.

Results of the conducted researches have allowed to establish reasonably standards of service life of the translations for various constructive registration and various service conditions of the subway on the basis of forecasting of wear of metal elements of railroad switches.

Key words: *switch, switch tongue, frogs, wear, working conditions, operating life, service conditions, standard service life.*

Вступ. Одним із спеціальних видів міського транспорту, який використовує для руху поїздів рейкову колію та стрілочні переводи, є метрополітен.

Відмінність конструкції залізничної колії та стрілочних переводів метрополітену, їх умов експлуатації та конструкції ходових частин рухомого складу порівняно із магістральними залізницями суттєво впливає на формування силової динаміки взаємодії. Відповідно буде різнитись зносостійкість металевих елементів стрілочних переводів у процесі взаємодії.

Тому дослідження щодо зносостійкості елементів стрілочних переводів, що проводились для магістральних залізниць, некоректно використовувати для оцінювання роботи конструкцій переводів та їх строків служби в умовах метрополітену.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження впливу експлуатаційних чинників і конструктивних відмінностей стрілочних переводів на фор-

мування зносу та дефектності металевих елементів, а відповідно, прогнозування їх «життєвого циклу» проведено низкою наукових шкіл. Зокрема у Санкт-Петербурзькому університеті шляхів сполучення (раніше ЛПЗТ) плідно працювала наукова школа під керівництвом професорів С. В. Амеліна та В. Ф. Яковлева [1]; починаючи з другої половини ХХ сторіччя робота стрілочних переводів у різних умовах експлуатації детально вивчалася у ВНДІЗТ, де в подальшому було створено стрілочну лабораторію, серед основних досліджень якої можна виділити наукові праці професора Б. Е. Глюзберга [2]; в Україні можна виділити наукову школу ДПТ [3, 4], до представників якої належать такі відомі вчені, як професори М. А. Фрішман і Ю. Д. Волошко, доценти О. М. Орловський, В. П. Гнатенко та ін.; з кінця 1990-х років до сьогодні в Київському інституті залізничного транспорту діє наукова школа під керівництвом професора Е. І. Даніленка,

багато розробок якої було безпосередньо присвячено дослідженню експлуатаційних характеристик стрілочних переводів [5–8].

За кордоном при вивченні процесів зносу елементів стрілочних переводів найчастіше застосовують методи математичного моделювання й зокрема метод скінченних елементів [9–11].

Різні наукові школи дотримуються своїх підходів до оцінювання працездатності конструкцій та впливу умов експлуатації на ресурси роботи стрілочних переводів.

Зокрема в основу нормативів строків служби стрілочних переводів на залізницях РФ [2] покладено таблиці середньомережевих нормативних строків служби стрілок і хрестовин різних типів і марок переводів на дерев'яних і залізобетонних брусах для головних та приймально-відправних колій. При цьому середньомережеві нормативи строків служби коригуються відповідними коефіцієнтами, які враховують вплив осьових навантажень, вантажонапруженість та співвідношення поїздопотоків по прямій та боковій коліях. Нормативні строки служби стрілочних переводів визначають як добуток середньомережевих строків служби на коефіцієнти коригування для конкретних умов експлуатації.

У свою чергу розробки під керівництвом професора Е. І. Даніленка враховують умови експлуатації для конкретного типу та марки стрілочного переводу через узагальнену характеристику силового навантаження колії [5–8].

Загальнодоступні дослідження закордонних вчених щодо даної проблематики досить обмежені і не можуть бути повною мірою використані на вітчизняних залізницях через значні відмінності в умовах експлуатації та конструктивному оформленні стрілочних переводів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є встановлення нормативних строків експлуатації конструкцій для організації раціонального ведення колійного

господарства за умови забезпечення безпеки руху поїздів, а також для встановлення потреби в стрілочних переводах при плануванні робіт з їх ремонту або заміни. Для досягнення поставленої мети проведено комплексні експлуатаційні і теоретичні дослідження щодо особливостей формування зносу основних металевих елементів стрілочних переводів типів Р50 і Р65 марки 1/9 у головних коліях Київського метрополітену.

Основна частина дослідження. В сучасних умовах ведення стрілочного господарства як магістральних залізниць, так і метрополітенів, гостро стоїть проблема оптимального використання наявних ресурсів. Особливо це стосується питання зношуваності металевих елементів залізничної колії і зокрема частин стрілочних переводів – хрестовин та стрілок. Одним із критеріїв фактичного використання ресурсів є строки експлуатації конструкцій у певних умовах.

Загальноприйнятим є нормувати [5–8] гарантійні та нормативні строки служби конструкцій – стрілочних переводів та їх елементів (стрілок і хрестовин).

Нормативні строки служби стрілок і хрестовин [5, 7, 8] визначаються кількістю пропущеного по них тоннажу T_n до досягнення величини допустимого нормативного зносу h_n .

Нормативні строки служби для хрестовин призначають по досягненні допустимого вертикального зносу h_n вусовиків у найбільш зношуваному місці – зоні перекочування (між горлом і перерізом сердечника 30 мм) або сердечника (в перерізі 40 мм).

Нормативний строк служби стрілок визначають за допустимим зносом рамних рейок h_n (за потреби замінюються окремі передчасно зношені гостряки).

Нормативні строки служби стрілочного переводу в цілому визначають за станом стрілки і, насамперед, за зносом її головних рейкових елементів – гостряків і рамних рейок.

Вертикальний знос поверхні кочення несучих металевих елементів стрілочних переводів є одним із двох головних критеріїв, що визначають строк працездатності конструкції (другий критерій – дефектність) [5, 6, 13–15]. У відсотковому співвідношенні вихід металевих елементів стрілочних переводів з тих чи інших причин на різних лініях і категоріях колій може бути різним і визначатись, насамперед, різницею в експлуатаційних умовах, в яких працюють дані конструкції, що підтверджено дослідженнями провідних вчених. Процеси і закономірності формування вертикального зносу поверхні кочення хрестовин достатньо добре вивчені та неодноразово викладені в наукових працях [5–8, 13].

Зносостійкість основних металевих елементів стрілочних переводів було встановлено при комплексних експлуатаційних дослідженнях стрілочних переводів головних колій Київського метрополітену залежно від умов експлуатації [12, 13, 16, 17].

В дослідженні було задіяно 62 % стрілочних переводів від загальної кількості, що експлуатуються в підземних і наземних ділянках на головних коліях усіх трьох ліній. Дослідження зносостійкості проводились на 22 (52 %) стрілочних переводах типу Р50 марки 1/9 і 15 (83 %) переводах типу Р65 марки 1/9.

Досліджувані конструкції різнилися характеристиками пропущеного при експлуатації тоннажу, а також мали різні умови експлуатації: переважний напрямок руху поїздів – пошерстний (ПШ), та протишерстний (ПРШ); встановлені швидкості руху V на стрілочних переводах у прямому напрямку складала $V_{max} = 80$ км/год, а у боковому напрямку – V_{max} до 35 км/год.

Для ділянок зі стрілочними переводами типу Р50 марки 1/9 вантажонапруженість G , складала 21–

25 млн т за рік, а для ділянок з переводами Р65 марки 1/9 складала 17 млн т за рік. Пропущений тоннаж T на час досліджень зносостійкості хрестовин типу Р50 становив від 13,1 до 133,4 млн т, а хрестовин типу Р65 – від 24,6 до 106,2 млн т. Для елементів стрілки типу Р50 пропущений тоннаж становив від 31,3 до 367,4 млн т, а типу Р65 – від 224,7 до 397,7 млн т.

Для дослідження зносу елементів стрілочних переводів використано стандартну методику, що регламентована нормативними документами метрополітену та Укрзалізниці [5, 7, 8, 13, 16, 17].

За основу для прогнозування зносостійкості стрілочних переводів залежно від умов експлуатації (крім пропущеного тоннажу) прийнято аналітичну залежність

$$h = a\sqrt{T} + bT, \quad (1)$$

де T – тоннаж, що пропущений по конструкції хрестовини;

a і b – числові коефіцієнти, які мають конкретні значення для кожної конструкції, місця розміщення перерізу на хрестовині та експлуатаційних чинників.

Результати натурних вимірювань вертикального зносу на вусовиках й сердечниках хрестовин та гостряках і рамних рейках дали змогу провести апроксимацію та встановити прогнозні аналітичні залежності зносостійкості у вигляді функції (1) [13, 17].

До останнього часу нормативний строк служби основних металевих елементів стрілочних переводів у Київському метрополітені було встановлено відповідно до табл. 1 на підставі [12]. Зазначені нормативи враховували тільки типи та марки стрілочного переводу, їхній конструктивний елемент (стрілка або хрестовина) і призначення колій (головні або станційні).

Нормативний тоннаж основних елементів стрілочних переводів у Київському метрополітені

Найменування елементів	Тип, марка переводу	Нормативний тоннаж, млн т бруutto	
		Головні	Станційні (приймально-відправні) колії
Стрілки	P50, 1/5	-	250
	P50, 1/9	230	260
	P65, 1/9	300	360
Хрестовини	P50, 1/9	85	120
	P50, 2/9	100	120
	P65, 1/9	100	120

Зазначені норми не враховували низки особливостей, що обумовлюють роботу стрілочних переводів у конкретних умовах експлуатації.

Тому нормативні строки служби мають бути різними для конструкцій, що працюють у різних умовах експлуатації, тобто при різних осьових навантаженнях, різних швидкостях руху поїздів, різній вантажонапруженості тощо. Вони також є різними для різних типів і марок стрілочних переводів та відмінного переважного напрямку руху по переводах. Так, стрілочні переводи пошерстного (ПШ) і протишерстного (ПРШ) напрямків мають різні особливості формування зносу, тому їх треба розглядати окремо. Також слід враховувати, що вусовики хрестовин зношуються більш інтенсивно, ніж сердечники хрестовин, тому знос вусовиків і сердечників слід розглядати окремо. Більш інтенсивно зношуються вусовики ПШ-напряму у порівнянні з ПРШ-хрестовинами. І навпаки, сердечники хрестовин ПРШ-напряму зношуються більш інтенсивно у порівнянні з ПШ-хрестовинами. Вусовики ПШ-напряму більш інтенсивно зношуються навпроти перерізу сердечника 20 мм, рідше – навпроти перерізу 12 мм, тому нормативи зносу по вусовиках слід встановлювати по перерізу 20 мм. Нормативи зносу по сердечниках хрестовин встановлюють по

перерізу 40 мм. В усіх випадках вусовики навпроти перерізів 20-12 мм сердечника зношуються з більшою інтенсивністю, ніж сердечники в перерізі 40 мм, тому нормативи для строків служби хрестовин у цілому слід призначати по зносу вусовиків.

Крім того, має враховуватись якість хрестовин (виконані з металу вищої категорії якості зношуються менш інтенсивно у порівнянні з хрестовинами з металу гіршої якості).

На основі наведених особливостей для магістральних залізниць України [5, 8] використовується спеціально розроблена методика [5, 6, 8, 17], яку було взято за основу для нормування зносу елементів стрілочних переводів метрополітенів.

У зазначеній методиці, окрім вказаних особливостей, враховується комплексна характеристика силового навантаження колії $U_i = f(P_i, V_i, d_i, P_k^{дин})$, що включає всі основні чинники (крім пропущеного тоннажу T), які впливають на знос хрестовин, у тому числі: величини й спектр пропущених колісних навантажень P_i , швидкості руху поїздів V_i , діаметри коліс рухомого складу d_i , величини додаткових динамічних сил від нерівностей на поверхні кочення $P_k^{дин}$ та час дії динамічної сили Δt .

Розрахунок характеристики $U_3 = U + U_1$ виконано за методикою, наведеною у [5, 6, 8, 17]. Для одного із варіантів експлуатації стрілочних переводів типу Р65 і Р50 марки 1/9 при осьових навантаженнях $P_{oc} = 15$ тс та швидкості

руху поїздів по переводах на головних коліях $V_{гол} = 40$ км/год прогнозні розрахунки нормативного тоннажу з використанням залежності формування вертикального зносу $h = f(T)$ наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Прогнозний пропущений тоннаж для хрестовин типу Р50 і Р65 марки 1/9

Тип і марка стрілочного переводу	Середньо-зважені за тоннажем осьові та колісні навантаження, $\frac{P_{ось}^{сер}}{P_{кол}^{сер}}$, кН	Середньо-зважені за тоннажем швидкості руху поїздів, км/год / м/с	Комплексна характеристика експлуатаційних умов, U , кН·с	Основна характеристика експлуатаційних умов, U_1 , кН·с	Переважаючий напрям руху	Рівняння кривої зносу $h = f(T)$ в перерізі а) для сердечників хрестовин 40 мм; б) для вусовиків 20 мм	Прогнозний максимальний тоннаж, млн т брутто, для набуття відповідної величини вертикального зносу h , мм, за рівняннями кривих $h = f(T)$		
							4	5	6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Р50 1/9	150/75	40/11,1	131	111	ПШ	а) $h = 0,1162\sqrt{T} + 0,0135T$ б) $h = 0,2109\sqrt{T} + 0,0153T$	181	239	297
	150/75	40/11,1	131	111	ПРШ	а) $h = 0,3930\sqrt{T} + 0,0029T$ б) $h = 0,2498\sqrt{T} + 0,0085T$	114	155	197
Р65 1/9	150/75	40/11,1	131	111	ПШ	а) $h = 0,0606\sqrt{T} + 0,0130T$ б) $h = 0,1569\sqrt{T} + 0,0169T$	234	302	370
	150/75	40/11,1	131	111	ПРШ	а) $h = 0,1990\sqrt{T} + 0,0111T$ б) $h = 0,1670\sqrt{T} + 0,0107T$	130	172	218
							145	197	254
							169	230	294

На основі багатоваріантних розрахунків, виконаних за вказаною методикою, було встановлено рекомендовані значення нормативного тоннажу, що наведено в табл. 3, які визначають строк експлуатації металевих елементів стрілочних переводів для різних експлуатаційних умов Київського метрополітену. Нормативи встановлено для головних колій при осьових навантаженнях

до $P_{oc} = 15$ тс та швидкостях руху поїздів по переводах $V_{гол} = 70$ км/год.

Необхідними умовами забезпечення надійної та довготривалої експлуатації стрілочних переводів у колії є:

1) неперевищення допустимих норм зносу елементів стрілочних переводів, вказаних у табл. 3;

2) недопущення появи дефектів елементів стрілочних переводів, при яких

не дозволяється експлуатація стрілочних переводів;

3) неперевищення сумарного пропущеного тоннажу за період служби

стрілочних переводів відповідно до нормативів, що зазначені в табл. 3.

Таблиця 3

Рекомендовані нормативи пропущеного тоннажу для елементів стрілочних переводів типу P50 і P65 марки 1/9

Тип і марка хрестовини	Переважаючий напрям руху	Зношуваний елемент	Рекомендовані нормативи пропущеного тоннажу T, млн т бруто
P65 1/9	ЗШ	Вусовик хрестовини	115
	ПРШ	Сердечник хрестовини	150
	ЗШ,ПРШ	Рамна рейка	350
P50 1/9	ЗШ	Вусовик хрестовини	90
	ПРШ	Сердечник хрестовини	115
	ЗШ,ПРШ	Рамна рейка	260

Примітка. Нормативні терміни служби стрілочних переводів P65 1/9 і P50 1/9 встановлено відповідно до існуючої методики [5, 6, 8, 17] з визначення залежності вертикального зносу h_H елементів стрілочних переводів від пропущеного тоннажу $h = f(T)$ на основі експлуатаційних досліджень формування зносу елементів стрілочних переводів для умов Київського метрополітену.

При встановленні нормативних строків служби елементів стрілочних переводів не враховувались наявність та вплив дефектів елементів стрілочних переводів.

Умови експлуатації стрілочних переводів на ділянках головних колій метрополітену, де пропущений тоннаж перевищує нормативний, що вказаний в табл. 3, необхідно визначати залежно від стану стрілки та хрестовини й наявності непридатних і дефектних елементів. Для обстеження таких стрілочних переводів з перепропущеним нормативним тоннажем доцільно створювати спеціальну комісію згідно з встановленим на метрополітені порядком, яка визначає можливість, строки й умови подальшої експлуатації.

Висновки. Дослідженнями встановлено, що загальні закономірності напрацювання пропущеного тоннажу до граничних значень вертикального зносу елементів стрілочних переводів в умовах метрополітену мають характер, аналогічний до магістральних залізниць, тому є підстави застосовувати відповідну методику для обґрунтування нормативних строків служби для умов експлуатації Київського метрополітену. Також в обов'язковому порядку необхідно брати до уваги переважаючий напрям руху (ПШ або ПРШ), що спричиняє суттєвий вплив на формування зносу металевих елементів стрілочних переводів.

Проведені дослідження зносостійкості дали змогу більш обґрунтовано підійти до встановлення нормативних строків служби

стрілочних переводів, що дозволило збільшити норми напрацювання нормативного тоннажу до набуття максимально допустимого вертикального зносу для умов експлуатації в головних коліях.

Порівняння нормативів табл. 1 зі встановленими на підставі виконаних досліджень величинами нормативного тоннажу показує:

1) для стрілочних переводів типу Р65 марки 1/9 при існуючій вантажонапруженості 17 млн т брутто / р. :

- для хрестовин при ПШ русі нормативний тоннаж можна збільшити на 15 %; при ПРШ русі – на 50 %, що в часовому еквіваленті становить відповідно 10 і 35 місяців;

- стрілки незалежно від напрямку руху нормативний тоннаж можна збільшити на 16,7 %, що в часовому еквіваленті становить відповідно 35 місяців;

2) для стрілочних переводів типу Р50 марки 1/9 при існуючій вантажонапруженості до 25 млн т брутто / р.:

- для хрестовин при ПШ русі нормативний тоннаж можна збільшити на 5,9 %; при ПРШ русі – на 35,3 %, що в часовому еквіваленті становить відповідно 2 і 14 місяців;

- стрілки незалежно від напрямку руху нормативний тоннаж можна збільшити на 26,1 %, що в часовому еквіваленті становить відповідно 14 місяців.

Отримані результати вказують на можливість суттєвої економії ресурсів не лише пов'язаних з вартістю матеріалів, але й ресурсів, обумовлених необхідністю проведення ремонтно-колійних робіт. Вказані підвищення норм пропущеного тоннажу не впливають на умови взаємодії колії та рухомого складу.

Список використаних джерел

1. Совершенствование ведения стрелочного хозяйства [Текст] / под ред. С. В. Амелина. – М. : Транспорт, 1983. – 240 с.
2. Руководство по ведению стрелочного хозяйства [Текст] / ОАО «РЖД». Департамент пути и сооружений. ОАО «ВНИИЖТ». – М. : ВНИИЖТ, 2009. – 240 с.
3. Волошко, Ю. Д. Как работают стрелочные переводы под поездами [Текст] / Ю. Д. Волошко, А. Н. Орловский. – М. : Транспорт, 1987. – 120 с.
4. Волошко, Ю. Д. Теоретическое исследование взаимодействия облегченных хрестовин с подвижным составом [Текст] / Ю. Д. Волошко, В. П. Гнатенко // Исследования взаимодействия пути и подвижного состава: сб. статей / под ред. М. А. Фришмана // Труды ДИИТ. – Днепропетровск : ДИИТ, 1977. – Вып. 188/18. – С. 8–13.
5. Даниленко, Э. И. Прогнозирование износа элементов рельсовых нитей с учетом эксплуатационных факторов [Текст] / Э. И. Даниленко // Сб. науч. трудов ПИИЖТ. – СПб. : ПИИЖТ, 1992. – С. 80–85.
6. Стрелочные переводы железных дорог Украины (Технология производства, эксплуатация в пути, расчеты и проектирование) [Текст] / Э. И. Даниленко, С. Д. Тараненко, А. П. Кутах; под ред. д.т.н., профессора Э. И. Даниленко. – К., 2001. – 296 с.
7. Експлуатаційні випробування стрілочних переводів на залізобетонних брусах марки Р65 1/11 та 1/9 українського та російського виробництва [Текст] : звіт про НДР (заключний) / Київський ун-т економ. і технол. трансп. – № 372/02-1027.02-Цтех. – К., 2003. – 150 с.
8. Даніленко, Е. І. Положення про нормативні строки служби стрілочних переводів у різних експлуатаційних умовах [Текст] / Е. І. Даніленко, М. І. Карпов, В. Д. Бойко. – К. : Транспорт України, 2003. – 30 с.

9. Jingmang Xu, Ping Wang, Li Wang, Rong Chen. Effects of profile wear on wheel-rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout [Text] // *Advances in Mechanical Engineering*. 2016, Vol. 8(1) 1–14.
10. M. Wiest, W. Daves, F.D. Fischer, H. Ossberger. Deformation and damage of a crossing nose due to wheel passages [Text] // *Original Research Article. Wear, Volume 265, Issues 9–10, 30 October 2008, P. 1431-1438.*
11. Simulation of wheel climb at worn switch points [Text] / Huimin Wu, Russell Walker, Scott Cummings, Sabri Cakdi // *RT and S: Railway Track and Structures*. – 2016. Vol. 112, No. 1, P. 12–14.
12. Технічні вказівки на експлуатацію рейок та елементів стрілочних переводів Київського метрополітену [Текст]: затв. 29.12.2001 р. наказом начальника КП «Київський метрополітен» № 289-Н.
13. Бойко, В. Д. Дослідження зносостійкості стрілочних переводів для умов експлуатації київського метрополітену [Текст] / В. Д. Бойко, В. М. Молчанов, Т. Д. Артюхович // *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 169. – С. 39–47.
14. Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів [Текст] / Е. І. Даніленко, А. М. Орловський, А. П. Татуревич [та ін.]. – Дніпропетровськ : Арт-Пресс, 2000. – 81 с.
15. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України [Текст] / Е. І. Даніленко, А. М. Орловський, М. Б. Курган [та ін.]. – К. : ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. – 495 с.
16. Технічні умови на експлуатацію стрілочних переводів на коліях Київського метрополітену [Текст]: нормативно-технічне видання / Е. І. Даніленко, М. І. Карпов, В. В. Косарчук [та ін.]. – К. : КП «Київський метрополітен», 2015. – 19 с.
17. Встановлення умов експлуатації стрілочних переводів на коліях Київського метрополітену [Текст]: звіт про виконання НДР / Державний економіко-технологічний університет транспорту – № 55 П-13 від 01.10.2013 р.

Бойко Володимир Дмитрович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.
Молчанов Віталій Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.
Сорока Ольга Олексіївна, старший викладач кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету інфраструктури та технологій. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.

Бойко Владимир Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент кафедры железнодорожного пути и путевого хозяйства Государственного университета инфраструктуры и технологий. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.
Молчанов Виталий Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры железнодорожного пути и путевого хозяйства Государственного университета инфраструктуры и технологий. Тел.: (044)-5915147.
E-mail: zkks@ukr.net.

Сорока Ольга Алексеевна, старший преподаватель кафедры железнодорожного пути и путевого хозяйства Государственного университета инфраструктуры и технологий. Тел.: (044)-5915147. E-mail: zkks@ukr.net.

Boiko Volodymyr Dmytrovych, PhD in Engineering sciences, docent of the department «Railway and track facilities» State University of infrastructure and technology. Tel.: (044) 591-51-47. E-mail: zkks@ukr.net.
Molchanov Vitalii Mykolaiovych, PhD in Engineering sciences, docent of the department «Railway and track facilities» State University of infrastructure and technology. Tel.: (044) 591-51-47. E-mail: zkks@ukr.net.
Soroka Olha Oleksiivna, engineer, pg. of the department «Railway and track facilities» State University of infrastructure and technology. Tel.: (044) 591-51-47. E-mail: zkks@ukr.net.

Статтю прийнято 29.05.2018 р.

УДК 625.143

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІЇ ТА РУХОМОГО СКЛАДУ ЗА НАЯВНОСТІ ПОЧАТКОВИХ НЕРІВНОСТЕЙ НА ПОВЕРХНІ КОЧЕННЯ РЕЙОК

Д-р техн. наук О. М. Даренський, кандидати техн. наук В. Г. Вітольберг, Д. О. Потапов, слухачі П. Т. Сторчай, Д. М. Дудіков

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ НАЛИЧИЕ НАЧАЛЬНЫХ НЕРОВНОСТЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ РЕЛЬСОВ

Д-р техн. наук А. Н. Даренский, кандидаты техн. наук В. Г. Витольберг, Д. А. Потапов, слушатели П. Т. Сторчай, Д. Н. Дудиков

FEATURES OF THE INTERACTION OF THE TRACK AND THE ROLLING STOCK WITH THE PRESENCE OF INITIAL ROUGHNESS ON THE SURFACE OF THE ROLLING OF RAILS

Dr. sc. sciences O. M. Darenskiy, phd. tehn. V. G. Vitolberg, D. O. Potapov, listeners P. T. Storchay, D. M. Dudikov

У статті розглядаються питання, пов'язані із взаємодією залізничної колії і рухомого складу. Зокрема як розрахункову схему залізничної колії пропонується використовувати схему, в якій рейки спираються на окремі опори, які мають нелінійні пружно-дисипативні характеристики. Виходячи з перспектив впровадження швидкісного руху на окремих ділянках регіональних філій ПАТ «Укрзалізниця», крім основних факторів, що впливають на загальний напружений стан залізничної колії, в розрахунковій моделі введено величину початкових нерівностей на поверхні кочення рейок. Проведено багатоваріантні розрахунки з визначення вертикальних сил залежно від величин початкових нерівностей на поверхні кочення рейок вітчизняного і закордонного виробництва. Результати розрахунків указують на безумовний вплив величини заводських нерівностей на рівень вертикальних сил. Рівень цих сил вищий (за інших рівних умов) на рейках українського виробництва.

Ключові слова: залізнична колія, рейки, рухомий склад, сили взаємодії, розрахункова схема, нерівності, поверхня кочення.

В статье рассматриваются вопросы, связанные с взаимодействием железнодорожного пути и подвижного состава. В частности, в качестве расчетной схемы железнодорожного пути предлагается использовать схему, в которой рельсы опираются на отдельные опоры, которые обладают нелинейными упруго-диссипативными характеристиками. Исходя из перспектив внедрения скоростного движения на отдельных участках региональных филиалов ПАО «Укрзалізниця», помимо основных факторов, влияющих на общее напряженное состояние железнодорожного пути, в расчетные модели введена величина первоначальных неровностей на поверхности катания рельсов. Были проведены многовариантные расчеты по определению вертикальных сил в зависимости от величин первоначальных неровностей на поверхности катания рельсов отечественного и зарубежного производства. Результаты расчетов свидетельствуют о несомненном

влиянии величины заводских неровностей на уровень вертикальных сил. Уровень этих сил выше (при прочих равных условиях) на рельсах украинского производства.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельсы, подвижной состав, силы взаимодействия, расчетная схема, неровности, поверхность катания.

The article deals with issues related to the interaction of the railway track and rolling stock. In particular, as a computational scheme of the railway track, it is proposed to use a scheme in which the rails are supported by separate supports that have nonlinear elastic-dissipative characteristics, which, according to the authors, most accurately describes the power processes in the "carriage-track" system. Since the originally proposed design scheme was supposed to be used for operational conditions of railways of industrial transport, its preliminary adaptation was carried out, taking into account the structural features of the rolling stock of the main railway lines of "Ukrzaliznytsya". Based on the prospects for introducing high-speed traffic in certain sections of the regional branches of "Ukrzaliznytsya", in addition to the main factors affecting the overall stress state of the railway track, the initial roughnesses on the rolling surface of rails are introduced into the calculation models. The comparative analysis of the requirements for the straightness of rails of domestic and foreign production, showed significant differences, both in terms of the tolerances allowed, and in approaches to controlling this indicator. This allowed, modeling the most unsuccessful combinations of irregularities along the entire length, as well as at the end sections, to carry out multivariate calculations to determine the vertical forces, depending on the magnitude of the initial unevenness on the rolling surface of the rails. The rails of domestic production and foreign were taken as settlement ones. The results of the calculations show the undoubted influence of the magnitude of the factory roughness on the surface of the rolling of rails on the level of vertical forces. The level of these forces is higher (with other things being equal) on the rails of Ukrainian production.

Keywords: railway track, rails, rolling stock, interaction forces, circuit diagram, inequality, rolling surface.

Вступ. Сучасний етап розвитку залізничної інфраструктури Європейського Союзу та країн близького зарубіжжя продемонстрував безперечні переваги впровадження швидкісного та високошвидкісного руху на залізницях.

На сьогодні у світі введено в експлуатацію високошвидкісні магістралі (ВШМ), на яких поїзди розвивають швидкість до 350 км/год. Найбільшу довжину ВШМ в Європі мають Іспанія, Франція, Німеччина, Італія. Найбільш інтенсивно розвиваються високошвидкісні перевезення в Іспанії та Китаї. Загальна довжина ВШМ становить близько 22 тис. км, з них в Європі експлуатується понад 6 тис. км, а полігон, де експлуатуються високошвидкісні поїзди з урахуванням реконструйованих залізниць, становить понад 16 тис. км [1, 2].

Умовно, з деякою часткою спрощення, можна виділити три основних концептуальних підходи до організації високошвидкісного руху. Японська та іспанська концепції передбачають спорудження ВШМ, залізнична система яких повністю ізольована від решти залізничної мережі країни. Французька концепція передбачає будівництво нових ВШМ, що входять до загального складу мережі, але призначених виключно для високошвидкісного рухомого складу. Італійська і німецька концепції полягають у комплексній реконструкції залізничних напрямків, при якій здійснюється будівництво високошвидкісних ділянок і модернізація існуючих ліній [3, 4]. Тобто у передових, у технічному відношенні, країнах вже не ставиться питання про необхідність будівництва ВШМ, там

ведеться пошук оптимальних схем фінансування для реалізації таких проектів.

Оскільки процеси взаємодії колії та рухомого складу на цих ділянках мають суттєві особливості, що може виражатися у рівні сил взаємодії в системі «екіпаж–колія», питання визначення рівня цих сил є достатньо актуальним, виходячи з перспектив упровадження швидкісного руху на коліях ПАТ «Укрзалізниця».

У загальному випадку рівень сил взаємодії залежить від багатьох експлуатаційних факторів (осьове навантаження, встановлені швидкості руху, план, профіль колії та ін.), але при швидкостях руху більше 200 км/год достатньо істотний вплив, на нашу думку, має і величина нерівностей на поверхні кочення рейок. Тому урахування цього показника при визначенні загального напруженого стану в елементах залізничної колії є необхідною вимогою для забезпечення достатнього рівня безпеки на перспективних ділянках впровадження швидкісного руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У переважній більшості досліджень [5–11], які присвячені питанням взаємодії колії і рухомого складу, розрахункам напружено-деформованого стану колії, як основна розрахункова схема використовується схема балки на суцільній пружній основі. Це викликано, перш за все, зручністю і простотою рішень. Наприклад, для розв'язання задачі про вимушені або власні коливання колії в одній площині достатньо зіставити одне диференціальне рівняння четвертого ступеня, яке розв'язується аналітично тим або іншим способом, іноді із застосуванням апарату спектральної теорії випадкових чисел. Однак така розрахункова схема передбачає ряд важливих припущень, які надмірно ідеалізують колію та її технічний стан. Серед таких припущень є таке, що підрейкова основа має постійний модуль пружності і реакції цієї основи мають лінійний характер, що, звичайно, не

відповідає реальним умовам експлуатації. Наприклад, у зимових умовах, коли жорсткість підрейкової основи зростає на 40-60 % величина динамічних сил збільшується на 25-30 %.

Тому у [12, 13, 14] запропоновано модель, в якій розрахункову схему залізничної колії подано у вигляді балок-рейок, які спираються на окремі пружно-дисипативні опори-шпали з нелінійними характеристиками. В першу чергу, подана модель призначена для експлуатаційних умов колій незагального користування, виходячи з особливостей характеристик спеціального і спеціалізованого рухомого складу, але сам метод з визначення просторових пружно-динамічних характеристик дискретних рейкових опор із подальшим виходом на оцінку загального напруженого стану елементів залізничної колії (із використанням методу скінченних елементів) може бути використаний і для умов магістральних залізниць.

А беручи до уваги вплив початкових нерівностей на поверхні кочення рейок на величину сил взаємодії (особливо при великих швидкостях руху), доповнення цієї моделі саме цим параметром дасть змогу найбільш адекватно оцінювати загальний напружений стан в елементах залізничної колії.

Визначення мети та завдання дослідження. Тому метою дослідження є визначення впливу величини початкових геометричних нерівностей на поверхні кочення рейок на рівень вертикальних сил взаємодії динамічної системи «екіпаж–колія».

Відповідно до мети було сформульовано такі завдання:

1. Адаптація моделі розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії із застосуванням просторової розрахункової схеми колій у вигляді балок-рейок, які спираються на пружно-дисипативні опори-шпали з нелінійними характеристиками для умов магістральних колій регіональних філій ПАТ «Укрзалізниця».

2. Порівняльний аналіз вимог щодо прямолінійності поверхні кочення рейок вітчизняного та закордонного виробництва.

3. Розрахунок вертикальних сил з урахуванням величини початкових геометричних нерівностей на поверхні кочення для рейок вітчизняного та закордонного виробництва.

Основна частина дослідження.

Основні положення математичної моделі, в якій рейки спираються на окремі опори, з

нелінійними пружно-дисипативними характеристиками, викладено нижче [12, 21].

При русі екіпажа з постійною швидкістю кількість лінійних і кутових переміщень його елементів дорівнює сімнадцяти.

За умови, що екіпаж рухається з постійною швидкістю, його коливання описуються системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}
 & 1) M\ddot{q}_1 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = M_g \\
 & 2) I_{ZK} \cdot \ddot{q}_2 + \ell(P_1 + P_2) - \ell(P_3 + P_4) = 0 \\
 & 3) m_T \cdot \ddot{q}_3 - P_1 - P_2 = m_T g - R_1 - R_2 - R_3 - R_4 \\
 & 4) I_{ZT} \cdot q_4 + m_T (\ddot{q}_3 - g) \cdot d \operatorname{sign}(q_4 - q_2) = a(R_3 + R_4) - a(R_1 + R_2) \\
 & 5) m_T \cdot \ddot{q}_5 - P_3 - P_4 = m_T \cdot g - R_5 - R_6 - R_7 - R_8 \\
 & 6) I_{ZT} \cdot \ddot{q}_6 + m_T (\ddot{q}_5 - g) \cdot d \operatorname{sign}(q_6 - q_2) = a(R_7 + R_8) - a(R_5 - R_6) \\
 & 7) M\ddot{q}_7 + Q_1 + Q_2 = M \frac{V^2}{\rho_{xoz}} + Q_{ZK} - Q_{hk} \\
 & 8) I_{YT} \cdot \ddot{q}_8 + Q_1 \cdot \ell - Q_2 \cdot \ell + M_{TP1} \operatorname{sign}(\dot{q}_8 - \dot{q}_{10}) + M_{TP2} \operatorname{sign}(\dot{q}_8 - \dot{q}_{12}) = 0 \\
 & 9) m_T \cdot \ddot{q}_9 - Q_1 = m_T \frac{V^2}{\rho_{XT1}} - N_1 - N_2 - Q_{hT1} \\
 & 10) I_{YT} \cdot \ddot{q}_{10} + M_{TP1} \operatorname{sign}(\dot{q}_{10} - \dot{q}_8) = M_{n1} + M_{n2} + (N_2 - N_1) \cdot a \\
 & 11) m_T \cdot \ddot{q}_{11} - Q_2 = m_T \frac{V^2}{\rho_{XT2}} - N_3 - N_4 - Q_{hT2} \\
 & 12) I_{YT} \cdot \ddot{q}_{12} + M_{TP2} \operatorname{sign}(\dot{q}_{12} - \dot{q}_8) = M_{n3} + M_{n4} + (N_4 - N_3) \cdot a \\
 & 13) I_{\delta X} \cdot \ddot{q}_{13} + P_{T1} \cdot d \operatorname{sign}(q_{13} - q_{17}) + (B_{1,l} - B_{1,np}) \cdot \epsilon_1 + (P_1 - P_2) \cdot \epsilon = 0 \\
 & 14) I_{\delta X} \cdot \ddot{q}_{14} + P_{T2} \cdot d \operatorname{sign}(q_{14} - q_{17}) + (B_{2,l} - B_{2,np}) \cdot \epsilon_1 + (P_3 + P_4) \cdot \epsilon = 0 \\
 & 15) I_{TX} \cdot \ddot{q}_{15} + (P_2 - P_1) \cdot \epsilon - Q_1 \cdot H_1 = R_2 \cdot S_2(t) - R_1 \cdot S_1(t) + R_4 S_4(t) - \\
 & \quad - R_3 \cdot S_3(t) - N_1 r_1(t) - N_2 r_2(t) \\
 & 16) I_{TX} \cdot \ddot{q}_{16} + (P_4 - P_3) \cdot \epsilon - Q_2 \cdot H_1 = R_6 \cdot S_6(t) - R_5 \cdot S_5(t) - R_8 \cdot S_8(t) - \\
 & \quad - R_7 S_7(t) - N_3 r_3(t) - N_4 r_4(t) \\
 & 17) I_{KX} \cdot \ddot{q}_{17} + M \cdot \ddot{q}_7 H_0 + P_{T1} \cdot d \operatorname{sign}(q_{17} - q_{13}) + P_{T2} \cdot d \operatorname{sign}(q_{17} - q_{14}) + \\
 & \quad + (B_{1,np} + B_{2,np} - B_{1,l} - B_{2,l}) \cdot \epsilon_1 = M \frac{V^2}{\rho_{xoz}} \cdot H_0 + Q_{ZK} \cdot H_0
 \end{aligned} \tag{1}$$

У системі рівнянь (1) прийнято такі позначення:

M – маса підресорених елементів вагона, кг;

m_T – маса непідресорених елементів візка, кг;

I_{YK}, I_{ZK}, I_{KX} – відповідно моменти інерції підресорених елементів вагона відносно осей Y і Z і момент інерції кузова вагона відносно осі X , яка проходить на рівні п'ятників вагона, $кг \cdot м^2$;

I_{YT}, I_{ZT}, I_{TX} – момент інерції непідресорених елементів візків відносно осей Y і Z , X , $кг \cdot м^2$;

$J_{\delta X}$ – момент інерції надресорної балки відносно осі X , $кг \cdot м^2$;

2ℓ – відстань між центрами шворнів, м;

H_0 – відстань від площини п'ятника до центру мас, м;

$2d$ – діаметр п'ятника вагона, м;

$2\delta_1$ – відстань між ковзунами, м;

$2a$ – база візка, м;

2δ – відстань між серединами ресорних комплектів, м;

H_1 – відстань від осі колісної пари до площини п'ятника, м;

Q_{zk} – горизонтальна бічна результуюча зовнішніх сил, що діють на кузов, H ;

Q_1 і Q_2 – горизонтальні поперечні реакції ресорних комплектів першого і другого візка, H ;

Q_{hk} – горизонтальна складова сил ваги кузова, викликана підвищенням зовнішньої рейки, м;

Q_{hT1}, Q_{hT2} – горизонтальні складові сил ваги візка, викликані підвищенням зовнішньої рейки, H ;

P_1, P_2, P_3, P_4 – вертикальні реакції ресорних комплектів першого і другого візків, H ;

P_{T1} і P_{T2} – реакції, що діють на п'ятники вагона з боку підп'ятників візків, H ;

$B_{1np}, B_{2np}, B_{1л}, B_{2л}$ – вертикальні реакції на правих і лівих ковзунах першого і другого візка, H ;

M_{mp1}, M_{mp2} – моменти сил тертя, що виникають у шворневих перетинах при поворотах першого і другого візків у горизонтальній площині, $H \cdot м$;

R_{1-8} – вертикальні реакції, які діють на колесо з боку колії, H ;

N_{1-4} – результуючі горизонтальних поперечних сил взаємодії коліс і рейок, H ;

$M_{n1}, M_{n2}, M_{n3}, M_{n4}$ – моменти поздовжніх складових сил тертя коліс по рейках для 1-4 колісної пари, $H \cdot м$;

$r_{1-8}(t)$ – радіуси кругів катання коліс у точках контакту колеса і рейки, м;

$S_{1-8}(t)$ – відстані від середини колісних пар до точок контакту колеса і рейки, м;

g – прискорення вільного падіння, $м/с^2$;

V – швидкість руху екіпажів, $км/год$;

$\rho_{\text{хоз}}$ – радіус кривизни колії, відповідний центру ваги кузова екіпажа, м;

ρ_{xm1}, ρ_{xm2} – радіуси кривизни колії, відповідні центрам ваги першого і другого візків, м.

У розрахунковій схемі системи «екіпаж–колія» прийнято, що залізнична колія у вертикальній площині має пружно-дисипативні властивості. Тоді вертикальні реакції рейки під колесами за наявності в колії демпфірувальних сил тертя і одностороннього зв'язку колеса і рейки можна визначити:

$$\left. \begin{aligned} R_{1-8} &= C_{\delta}(\delta_{zcc} + \delta_{z1-8}) + \beta_{\delta}(\delta_{z1-8}) \cdot \text{sign } \delta_{z1-8} \text{ при } (\delta_{zcc} + \delta_{z1-8}) \geq 0 \\ R_{1-8} &= 0 \text{ при } (\delta_{zcc} + \delta_{z1-8}) < 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де C_6 – приведена вертикальна жорсткість рейкової нитки під колесом, H/m ;

β_6 – коефіцієнт дисипації конструкції колії у вертикальній площині, $\left(\frac{H \cdot c}{m}\right)$;

δ_{zcc} – статичне прогинання рейки під колесом, m ;

δ_{z1-8} – динамічні деформації колії під колесами у вертикальній площині, m .

Деформації колії у вертикальній площині визначаються виразом, m :

$$\delta_{z1-8} = q_{3,5} \pm q_{4,6} \cdot a \pm q_{15,16} S_{1-8}(t) + \Delta r_{1-8} - \eta_{неpz1-4}, \quad (3)$$

де $S_{1-8}(t)$ – відстані від середини колісних пар до точок передачі вертикальних навантажень від коліс на рейки, m ;

Δr_{1-8} – зміна радіуса в точці контакту колеса з рейкою щодо радіуса середнього круга катання, m ;

$\eta_{неpz1-4}$ – вертикальні геометричні нерівності колії під кожною колісною парю, m .

Вертикальні сили взаємодії підсистем «екіпаж» і «колія», з урахуванням прийнятих допущень про пружно-дисипативні властивості колії, визначаються за формулою:

$$R_{1-4} = C_6(\delta_{zcc} + \delta_{z1-8}) + \beta_6(\dot{\delta}_{z1-8}) \cdot \text{sign} \delta_{z1-8}.$$

Перший доданок у правій частині цієї формули є пружною складовою, а другий – дисипативною складовою вертикальних сил взаємодії.

Дослідження [12, 15, 16] показали, що осідання опор, які знаходяться далі 2,5 m від точки дії вертикальної сили, складають

величини третього порядку малості в порівнянні з осіданнями опор, які знаходяться ближче ніж 0,5 m від цієї точки. Тому рейкова нитка розглядається як балка з дев'ятьма прольотами на десяти пружних опорах (рис. 1).

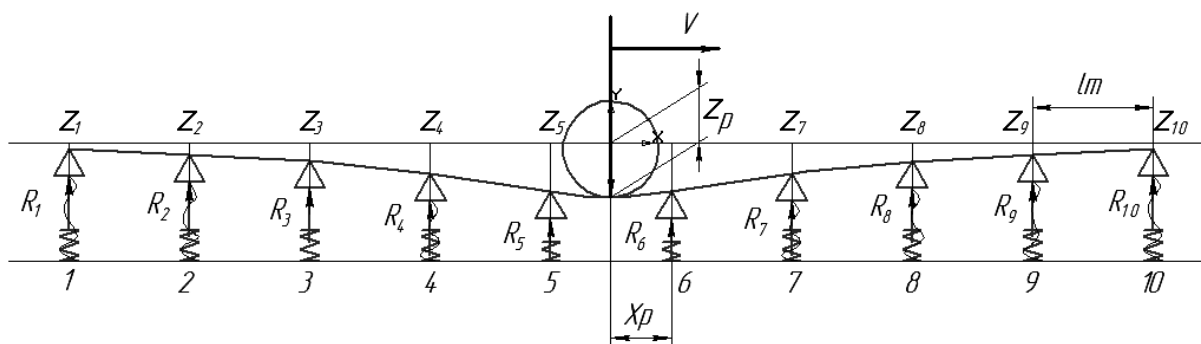


Рис. 1. Розрахункова схема рейкової нитки на пружних опорах під дією сили, що рухається:

z_i – прогинання рейки на опорах; z_p – прогинання рейки під колесом

Відстань X_{pi} від опори 6 до точки прикладення сили R_{zni} кожної колісної пари змінна і визначається для прийнятої розрахункової схеми співвідношенням:

$$X_p = \ell_{uu} \left(1 - \left\{ \frac{X_{ni}}{\ell_{uu}} \right\} \right), \quad (4)$$

де ℓ_{uu} – відстань між опорами, м;

$\left\{ \frac{X_{ni}}{\ell_{uu}} \right\}$ – дробова частина співвідношення $\frac{X_{ni}}{\ell_{uu}}$;
 X_{ni} – поточна абсциса кожної пари, м.

Змінна величина приведеної вертикальної жорсткості рейкової нитки в точці контакту колеса і рейки визначається як, Н/м:

$$C_{vi} = \frac{R_{znn}}{z_{pi}}, \quad (5)$$

де z_{pi} – прогинання рейки під колесом.

Запропонована методика визначення приведеної вертикальної жорсткості рейкової нитки C_a у точці контакту колеса і

рейки дає змогу враховувати не тільки пружні і геометричні характеристики рейок, але і жорсткості опор C_z , а також і відстані між ними ℓ_{uu} . Величина C_{vi} змінна в часі для кожного колеса і у будь-який момент часу t різна для різних коліс екіпажа. Основним допущенням є $\ell_{uu} = const$. Проте в реальних умовах ці величини мають випадкові властивості. Крім того, між рейкою і опорами (шпалами) можуть існувати люфти λ , що також мають статистичні властивості.

Переходячи до другої задачі для досягнення поставленої мети дослідження, було проведено порівняльний аналіз вимог до рейок вітчизняного та закордонного виробництва.

Основні вимоги до рейок вітчизняного виробництва наведені в ДСТУ 4344:2004 [19, 20]. Зокрема в ньому зазначається, що поодинокі місцеві деформації по всій довжині рейки на довжині 1,5 м не мають перевищувати 0,3 мм для рейок вищої категорії і 0,6 мм для рейок I, II, та III категорій. Крім того, кривизна кінців у горизонтальній та вертикальних площинах під час вимірювання стріли угину на довжині 1,5 м має відповідати значенням табл. 1.

Таблиця 1

Допустимі відхилення від прямолінійності рейок вітчизняного виробництва згідно з ДСТУ 4344:2004

Напрямок кривизни	Кривизна кінців рейок, мм, категорій			
	Вищої	I	II	III
Вгору (по хорді)	0,5	0,7	0,8	0,7
Вниз (по дотичній)	не допускається	0,2	0,2	0,2
Горизонтально (по хорді)	0,5	0,7	1,0	0,7

Слід одразу зауважити, що у національному стандарті немає, як таких, рейок спеціального призначення саме для організації швидкісного та високошвидкісного руху.

У новому російському стандарті ГОСТ Р 51685-2013 «Рельсы железнодоро-

рожные. Общие технические условия» [18], який розроблено з урахуванням основних положень найбільш сучасного і гармонізованого багатьма Європейськими країнами стандарту на залізничні рейки EN 13674-1:2011 [E] «Railway applications – Track – Rail – Part 1: Vignole railway rails

46 kg/m and above EN 13674-1:2011» [17], залежно від призначення окремо виділено рейки спеціального призначення (СС – рейки для швидкісного суміщеного руху та ВС – рейки для високошвидкісного руху). Зокрема на ділянках зі швидкостями руху пасажирських поїздів більше 200 км/год

рекомендовані для укладання рейки ДТ350ВС та НТ320ВС.

Для цих категорій рейок, на нашу думку, вимоги щодо прямолінійності поверхні кочення (табл. 2) більш жорсткі і диференційовані у порівнянні з чинним вітчизняним стандартом.

Таблиця 2

Допустимі відхилення рейок ДТ350ВС (НТ320ВС) від прямолінійності

Елемент рейки	Напрямок відхилення	Величина відхилення, мм	Базова довжина, для якої встановлена величина відхилення, м
Основна частина рейки	У вертикальній площині	0,3	3
		та	
	У горизонтальній площині	0,2	1
		0,45	1,5
Кінцева зона рейки	Довжина зони	2 метри	
	У вертикальній площині	0,4	2
		та	
	У горизонтальній площині	0,3	1
		0,6	2
		та	
0,4		1	
Перехідна зона	Довжина зони	2 метри	
	У вертикальній площині	0,3	2
	У горизонтальній площині	0,6	2

Таким чином, на підставі даних щодо прямолінійності рейок вітчизняного та закордонного виробництва було сформовано вихідні дані (виходячи з найнесприятливіших поєднань) для розрахунків у програмній системі *Mathcad* з визначення параметрів динамічних процесів взаємодії колії та рухомого складу, зокрема при змінних параметрах жорсткості підрейкової основи та величин початкових нерівностей на поверхні кочення рейок для умов магістральних колій регіональних філій ПАТ «Укрзалізниця».

Було проведено багатоваріантні розрахунки. Як вихідні дані було використано технічні характеристики рухомого складу, який призначений для швидкостей руху до 160 км/год. Діапазон швидкостей складав 100-160 км/год. Величина початкових нерівностей на поверхні кочення рейок приймалася згідно з табл. 2.

Як приклади на рис. 2 наведено результати розрахунків для швидкості руху 160 км/год для рейок Р65 вітчизняного виробництва та рейок Р65 категорії ДТ350ВС.

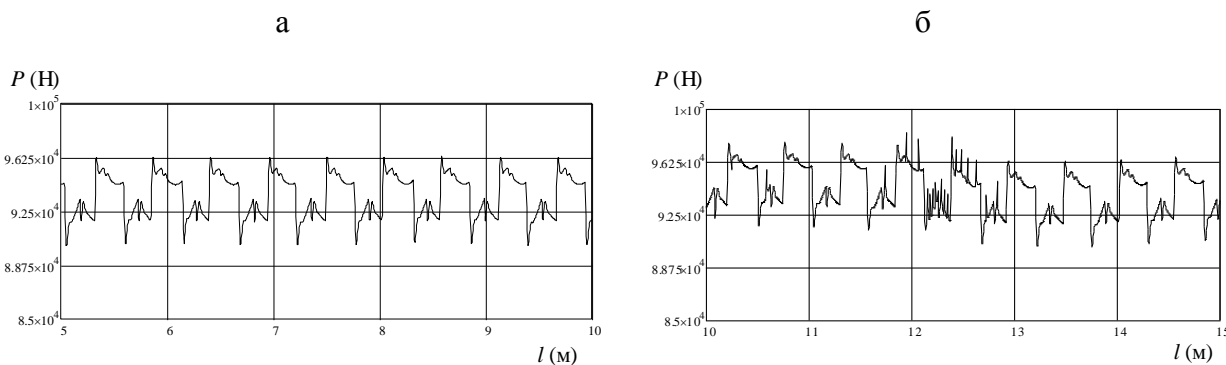


Рис. 2. Графіки зміни динамічних вертикальних сил, що діють від колеса на рейки типу Р65 вітчизняного виробництва:
а – без початкових нерівностей; б – з початковими нерівностями

Висновки:

1. Проведені дослідження дали змогу адаптувати модель розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії із застосуванням просторової розрахункової схеми колій у вигляді балок-рейок, які спираються на пружно-дисипативні опори-шпали з нелінійними характеристиками для умов магістральних колій регіональних філій ПАТ «Укрзалізниця».

2. Проведений порівняльний аналіз вимог щодо прямолінійності поверхні кочення рейок вітчизняного та закордонного виробництва показав досить суттєві розбіжності як за величинами допустимих відхилень, так і за методикою вимірювання.

3. За результатами проведених розрахунків вертикальних сил із урахуванням величини початкових геометричних нерівностей на поверхні кочення для рейок вітчизняного та закордонного виробництва можна констатувати збільшення рівня вертикальних сил на 5-9 % (для рейок виготовлених згідно з [19]). На нашу думку, при швидкостях руху понад 200 км/год вплив величини початкових геометричних нерівностей на сили взаємодії рухомого складу та колії для рейок вітчизняного виробництва буде більш суттєвим.

Список використаних джерел

1. Курган, Н. Б. Предпосылки создания высокоскоростных магистралей в Украине [Текст] / Н. Б. Курган // Українські залізниці. – 2015. – № 5–6 (23–24). – С.16–21.
2. Босов, А. А. Формирование вариантов рациональной сети линий высокоскоростного движения поездов в Украине [Текст]: монография / А. А. Босов, Г. Н. Кирпа. – Днепропетровск : ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2004. – 144 с.
3. Лapidус, Б. М. Железнодорожный транспорт на современном этапе [Текст] // Сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ» (ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»); под ред. Б. М. Лapidуса, Г. В. Гогричиани. – М. : ВМГ-Принт, 2014. – 292 с.
4. Розробка концепції впровадження швидкісного та високошвидкісного руху пасажирських поїздів на залізницях України в 2005–2015 роках [Текст] // Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — Дніпропетровськ, 2004. — 127 с.
5. Бромберг, Е. М. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] : Е. М. Бромберг, М. Ф. Вериги, В. Н. Данилов / под ред. М. А. Фришмана. – М. : Трансжелдориздат. – 1956. – 280 с.

6. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М. : Транспорт. – 1986. – 599 с.
7. Грачева, Л. О. Взаимодействие вагона и железнодорожного пути [Текст] / Л. О. Грачева // Тр. ВНИИЖТ. – 1968. – № 6. – С. 9-11.
8. Вериго, М. Ф. Определение динамического модуля пути [Текст] / М. Ф. Вериго // Техника железных дорог. – 1949. – №12. – С. 23-24.
9. Вериго, М. Ф. Вертикальные силы, действующие на путь при прохождении подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго // Труды ВНИИЖТ. – М. : Трансжелдориздат, 1955. – №97. – С. 25-288.
10. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь [Текст] : монография / Г. М. Шахунянц. – М. : Транспорт, 1987. – 479 с.
11. Першин, С. П. Вертикальная жесткость пути и его надежность [Текст] / С. П. Першин // Путь и путевое хозяйство. – 1996. – № 8. – С.8-10.
12. Даренський, О. М. Теоретичні та експериментальні дослідження роботи залізничних колій промислового транспорту [Текст] : монографія / О. М. Даренський. – Харків : УкрДАЗТ, 2011. – 204 с.
13. Даренський, О. М. Умови контактування коліс і рейок в горизонтальній площині. Силкові і кінематичні зв'язки екіпажу і колії [Текст] / О. М. Даренський // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків : УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 113. – С. 171-177.
14. Darenskiy, A. Results of researches by the numeral methods of vertical influences on the way of carriages of industrial transport at the railroad ties SB 3-0 [Text] / A. Darenskiy, V. Vitolberg // ТЕКА – Vol.12. – №4. – P. 36-40.
15. Карпущенко, Н. И. Совершенствование рельсовых скреплений [Текст] / Н. И. Карпущенко, Н. И. Антонов. – Новосибирск : Изд-во СГУСа, 2003. – 300 с.
16. Посібник з устрою, монтажу та утриманню проміжних пружних скріплень типу КПП [Текст] / С. М. Демченко, В. А Піскунов, О. В Миєнко, В. О. СISTRЕНСЬКИЙ. – К. : Швидкий рух, 2006. – 72 с.
17. Railway applications – Track – Rail – Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above [Text] / EN 13674-1:2011 – 122 p.
18. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия ГОСТ Р 51685-2013 [Текст]. – М. : Стандартиформ, 2014. – 102 с.
19. Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови. ДСТУ 4344:2004 [Текст]. – К. : Держспоживстандарт України, 2004. – 28 с.
20. Технические требования к высококачественным рельсам для магистральных железных дорог [Текст] / А. С. Рудюк, Я. М. Пыхтин, Л. И. Иванисенко, А. С. Беспоясова // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 44 (1087). – С. 136-145.
21. Alexander Darenskiy A mathematical model of the rail track presented as a bar on elastic and dissipative supports under the influence of moving loads / Alexander Darenskiy, Volodymyr Vitolberg, Denis Fast, Andrii Klymenko, Yaroslav Leibuk// MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – 116.

Даренський Олександр Миколайович, д-р техн. наук, професор кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-58. E-mail: prx_xiit@kart.edu.ua.
Вітольберг Володимир Геннадійович, канд. техн. 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, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-60. E-mail: prx_xiit@kart.edu.ua.
Сторчай Павло Тимофійович, слухач інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації Українського державного університету залізничного транспорту.
Дудіков Дмитро Миколайович, слухач інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації Українського державного університету залізничного транспорту.

Даренский Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры пути и путевого хозяйства Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, Тел.: (057) 730-10-58. E-mail:

ppx_xiit@kart.edu.ua.

Витольберг Владимир Геннадиевич, канд. техн. 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, канд. техн. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, Тел.: (057) 730-10-60. E-mail:

ppx_xiit@kart.edu.ua.

Сторчай Павел Тимофеевич, слушатель института переподготовки и повышения квалификации Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Дудиков Дмитрий Николаевич, слушатель института переподготовки и повышения квалификации Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Alexander Darenkiy, Dr. Sc. Science, Department of Track and Track Facilities Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-58. E-mail: ppx_xiit@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: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Pavlo Storchay, listener of the Institute of retraining and advanced training Ukrainian State University of Railway Transport.

Dmitro Dudikov, listener of the Institute of retraining and advanced training Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 18.05.2018 р.

УДК 624.074.43

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СООРУЖЕНИЙ ОБОЛОЧЕЧНОГО ТИПА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Канд. техн. наук П. А. Резник, асп. Р. В. Коренев (ХНУГХ имени А. Н. Бекетова)

ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СПОРУД ОБОЛОНКОВОГО ТИПУ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Канд. техн. наук П. А. Резник, асп. Р. В. Коренєв (ХНУМГ імені О. М. Бекетова)

THE FEATURES OF DEFORMATION OF SHELL-TYPE STRUCTURES UNDER CONDITIONS OF DYNAMIC LOADING

Phd. techn. sc. P. A. Reznik, pg R. V. Koreniev (O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv)

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния сооружения оболочечного типа, в качестве остова в котором используются холоднодеформируемые тонкостенные профили, от динамического действия ветра. Исследование проведено на базе составленной конечно-элементной модели, отображающей свойства оболочки специального назначения. На основании выполненных расчетов и анализа получены частоты и формы собственных колебаний конструкции. Верификация расчетной модели проведена на основе натурного

експеримента. Перечисленное в совокупности predeterminedlo внедрение системы через проектирование ряда возведенных объектов.

Ключевые слова: оболочечные системы, холоднодеформированные тонкостенные профили, динамическое действие ветра, устойчивость.

У статті розглянуто великопрогонові оболонкові конструкції, основним конструктивним елементом яких є тонколистовий холоднодеформований арковий металевий профіль, що виготовляється безпосередньо на будівельному майданчику. Проаналізовано особливості технології проведення будівельних робіт при монтажі зазначених конструкцій і розглянуто особливості та проблеми використання даних конструкцій на території України, США та країн Європейського Союзу.

Об'єктом дослідження є фрагмент зазначеної спеціальної оболонкової системи.

Мета дослідження полягає в побудові скінченноелементної моделі об'єкта дослідження, а також уточненні, на базі цієї моделі, існуючих методик розрахунку розглянутих конструкцій. Також метою дослідження є визначення частот власних та вимушених коливань об'єкта дослідження чисельним та експериментальним шляхом та верифікація скінченноелементної моделі за допомогою проведення натурного повномасштабного експерименту.

Розглянуто алгоритм скінченноелементного моделювання об'єкта дослідження та граничні умови розрахункової схеми.

Проведено аналіз напружено-деформованого стану споруди оболонкового типу від динамічної дії вітру, за остов в якій використовуються зазначені холоднодеформовані тонкостінні профілі. Дослідження проведено на базі складеної скінченно-елементної моделі, що відображає властивості оболонки спеціального призначення. На підставі виконаних розрахунків проведено аналіз напружено-деформованого стану та амплітудно-частотних (частоти і форми власних коливань) характеристик оболонкової конструкції. Верифікацію розрахункової моделі проведено на основі натурного експерименту, у ході якого до розглянутого повнорозмірного фрагмента оболонкової системи прикладали навантаження та проводили заміри амплітудно-частотних характеристик за допомогою двоканального віброаналізатора «ОНИКС». Перелічені в сукупності зумовило впровадження системи через проектування ряду зведених об'єктів.

Ключові слова: оболонкові системи, холоднодеформовані тонкостінні профілі, динамічна дія вітру, стійкість.

The article is devoted to the large-velocity shell designs, the main supporting element of which is thin-walled cold-deformed arched metal profile, which is manufactured directly on the construction site. The peculiarities of the technology of carrying out construction works during the installation of these structures are analyzed, and features and problems of the use of these structures in the territory of Ukraine, USA and the European Union countries are considered.

The object of the research is a fragment of the specified special shell system.

The purpose of the research is to construct a finite-element model of the research object, as well as refine, on the basis of this model, the existing methods of calculating the considered structures. Also, the goal of the study is to determine the frequency of own and forced fluctuations of the object of research, numerically and experimentally, and verification of the finite-element model, by conducting a full-scale experiment.

The algorithm of finite-element modeling of the research object is considered, and the boundary conditions of the calculation scheme are considered.

The analysis of the strained-deformed state of the shell-type structure from the dynamic effect of the wind is carried out, as the core in which these cold-deformed thin-walled profiles are used. The research was carried out on the basis of a compiled finite element model that implements the properties of a special-purpose shell. On the basis of the performed calculations, the analysis of the stress-strain state and the amplitude-frequency (frequency and shape of the proper oscillations) of the characteristics of the shell structure have been carried out. The calculation model was verified on the basis of a full-scale experiment, during which a load was applied to the considered full-size fragment of the shell-type system and measurements of amplitude-frequency characteristics were made by two-channel vibration analyzer "ONIKS". The enumerated in the aggregate predetermined the introduction of the system through the design of a number of erected objects.

Key words: shell-type systems, cold-deformed thin-walled profiles, dynamic wind action, stability.

Введение. Конструкции оболочечного типа (рис. 1) из холоднодеформированных тонколистовых металлических профилей обретают широкую популярность. Использование оболочечных конструкций данного типа в качестве остова и в качестве покрытия зданий и сооружений обуслов-

лено низкой стоимостью строительства, доступностью материалов, необходимых для производства, а также скоростью производства конструктивных элементов и монтажа. Изготовление конструктивных элементов, лежащих в основе данных систем, происходит на стройплощадке.



Рис. 1. Оболочечные конструкции из холоднодеформированных тонкостенных профилей

Анализ последних исследований и публикаций. Подробное описание технологии изготовления (в условиях строительной площадки) и производства работ по монтажу специальных оболочечных систем описывается в статье [1]. Особенность работы отдельных конструктивных элементов с трапециевидным поперечным сечением рассмотрены в работе [2]. Оценка работы поперечного сечения, с учетом редуцирующего фактора, обоснованного наличием поперечного гофрирования, вызванного особенностями

технологии производства конструктивного элемента, обозначены в работе [3]. В статьях [4], [5] приведена информация о сложностях эксплуатации, определенном числе аварий и их возможных причин для рассматриваемых систем.

Несмотря на возрастающую популярность описываемых конструкций в нормативных документах, действующих на территории Украины [6], [7], США и стран Европейского Союза, отсутствуют рекомендации и методики по их расчету и конструированию. Научный интерес

представляет напряженно-деформированное состояние указанных оболочечных систем.

Сказанное, в совокупности, предопределяет необходимость проведения численных и натурных экспериментальных исследований.

Определение цели и задания исследования. Цель исследования заключается в анализе напряженно-деформированного состояния указанных конструкций. Задачи исследования заключаются в построении конечно-элементной модели объекта исследования, а также в уточнении на ее

базе существующих методик расчета рассматриваемых конструкций и верификации ее, исходя из данных натурального эксперимента. Также к задачам исследования относится определение частот собственных и вынужденных колебаний объекта исследования численным и экспериментальным путем.

Основная часть исследования. Объектом исследования является фрагмент специальной оболочечной системы (рис. 2), основным несущим элементом которой является холоднодеформированный арочный тонкостенный профиль (рис. 3).



Рис. 2. Фрагмент специальной оболочечной системы

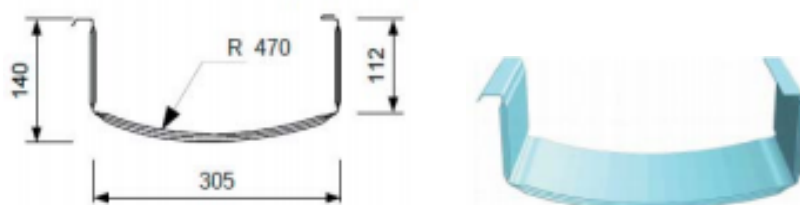


Рис. 3. Поперечное сечение арочного конструктивного элемента [8]

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние (НДС) объекта исследования при действии

статических и динамических нагрузок, частоты собственных и вынужденных колебаний объекта исследования.

Моделирование и расчет производили в среде многофункционального программного комплекса «Лира» [9], применяемом для проектирования и расчета строительных конструкций, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Применение именно МКЭ является наиболее оптимальным в такого рода задачах [10], [11].

Расчет производили исходя из следующих условий:

- справедливость гипотез Кирхгофа–Лява [12];
- закрепление систем в опорной зоне (в зоне оголовка фундамента) – неподвижный шарнир;
- элементы соединения арочных профилей между собой обеспечивают равнопрочные связи, что позволяет принять положение о совместном деформировании;

- влияние поперечных гофр арочного конструктивного элемента не учитывается;
- поперечное сечение (рис. 3), имеющее кривизну стенки, аппроксимировано поперечным сечением без кривизны, но с таким же моментом инерции;
- по торцам оболочечной системы принято закрепление, моделирующее наличие торцевых диафрагм, т. е. запрещены вертикальные и горизонтальные перемещения узлов, лежащих в плоскости торцевой диафрагмы.

Для решения поставленной задачи при моделировании применялся универсальный прямоугольный конечный элемент оболочки (КЭ 41). Данный КЭ предназначен для прочностного расчета тонких оболочек (плит, балок-стенок). На рис. 4 представлены схематическое изображение КЭ и последовательность нумерации его узлов.

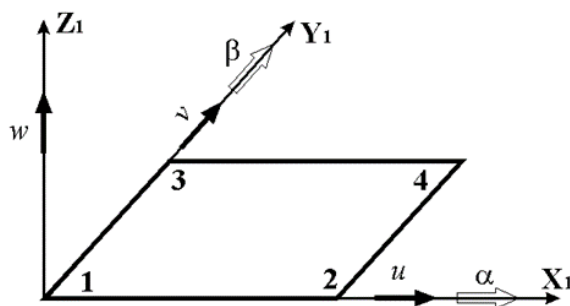


Рис. 4. Схематическое изображение КЭ 41

Исследуемая оболочечная система имеет следующие параметры:

- R – радиус оболочки, равный 11,63 м;
- $H=R$ – стрела подъема;
- $L=2R$ – длина оболочки;
- $t=1.2$ мм – толщина материала оболочки.

В качестве материала применялась сталь с физико-механическими характеристиками:

- объемный вес – 7.85 тс/м³;
- модуль упругости – $2,1 \times 10^5$ МПа;
- коэффициент Пуассона – 0,3.

Расчетная модель представляет собой ребристую оболочку (рис. 5), с указанными

габаритами и граничными условиями, состоящую из 18634 узлов и 18360 конечных элементов указанного типа. Толщина ребер (шпангоутов) принята как удвоенная толщина оболочки.

Результаты расчета, характеризующие напряженно-деформированное состояние рассматриваемых систем, представлены в виде изополей (рис. 6) главных напряжений.

Также определены 10 форм собственных колебаний, представленных в табл. 1, и соответствующие им амплитудно-частотные характеристики (табл. 2).

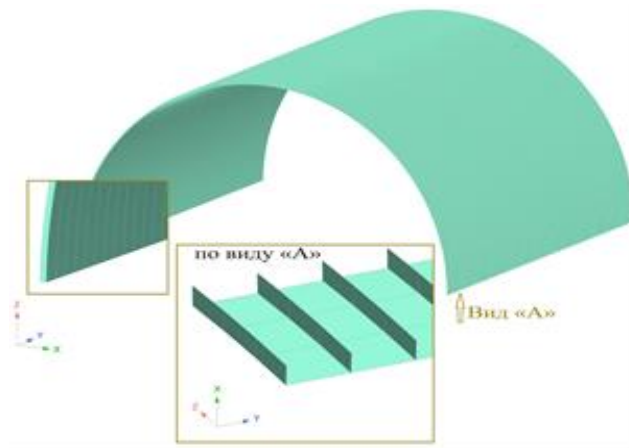


Рис. 5. Конечно-элементная модель исследуемой оболочечной системы

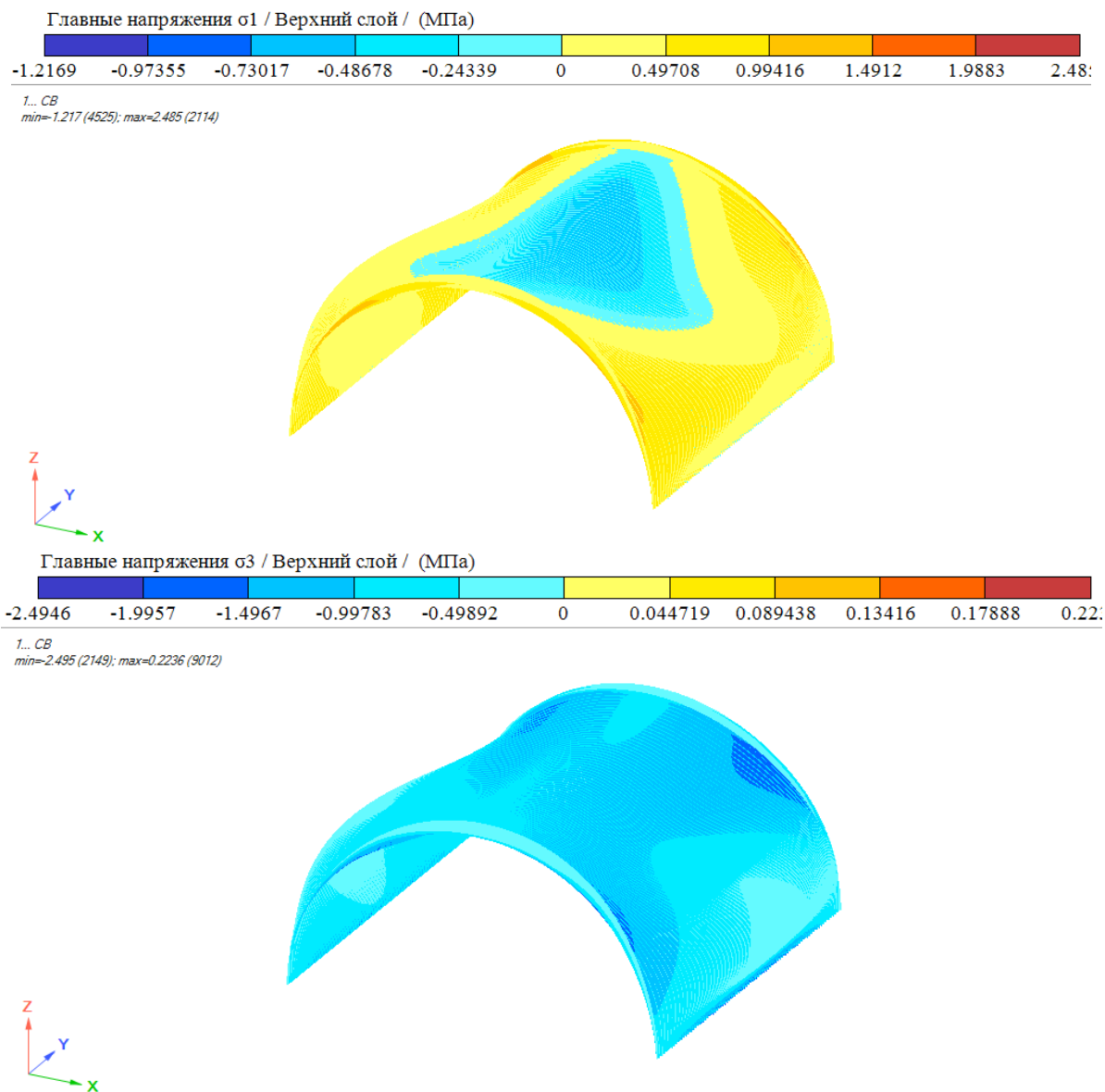
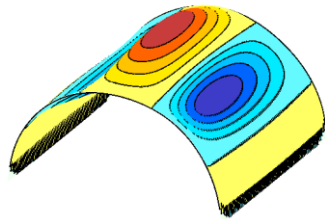
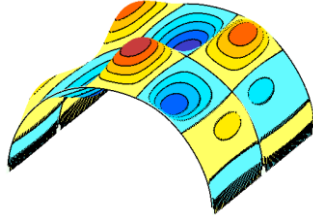
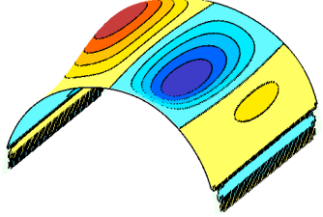
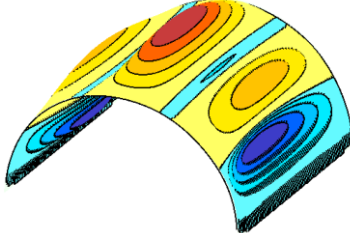
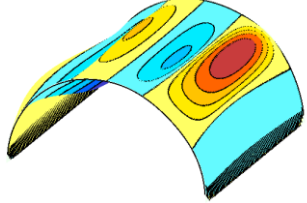
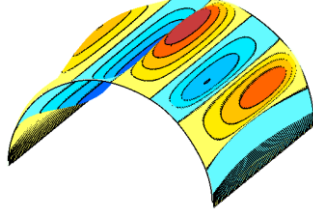
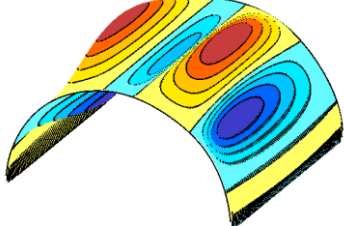
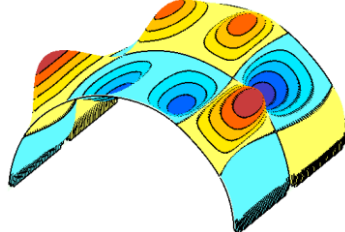
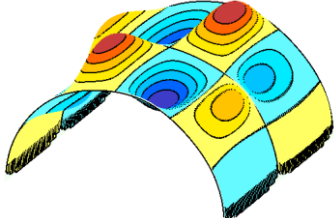
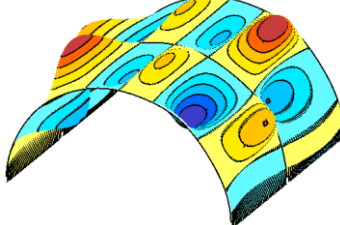


Рис. 6. Изополя главных напряжений σ_1 и σ_2 , МПа

Визуалізація форм власних коливань

Форма	Візуалізація	Форма	Візуалізація
1		6	
2		7	
3		8	
4		9	
5		10	

С целью верификации описанной конечно-элементной модели проводили натурный эксперимент, предполагающий определение амплитудно-частотных характеристик рассматриваемой оболочечной системы и сопоставление их с полученными ранее расчетным путем.

Для создания возмущения по конструкции наносили удар резиновым

молотом с «приблизительно» одинаковой силой. Следующая итерация производилась только после полного прекращения колебаний конструкции от предыдущего нагружения.

Измерение амплитудно-частотных характеристик (рис. 7) проводили с помощью двухканального виброанализатора ОНИКС (рис. 8).

Таблица 2

Амплитудно-частотные характеристики

Форма	Собственное значение	Частота, рад/с	Период, с	Коэффициент распределения	Модальная масса, %	Суммарная модальная масса, %
1	0.000305197	57.241	0.10977	-0.0592322	0.0155363	0.0155363
2	0.000282949	59.449	0.10569	0.0306276	0	0.020411
3	0.000155325	80.238	0.078307	0.0424732	0.0136741	0.0340851
4	0.000128959	88.059	0.071352	0.195334	0.277388	0.311473
5	9.43828E-05	102.93	0.061042	4.29946E-06	0	0.311473
6	9.29274E-05	103.74	0.060569	-2.29884E-05	0	0.311473
7	7.11866E-05	118.52	0.053013	0.835911	3.38754	3.69901
8	6.67174E-05	122.43	0.051322	0.182806	0.276098	3.97511
9	6.28316E-05	126.16	0.049805	-0.000313974	0	3.97511
10	6.19286E-05	127.07	0.049445	-0.000118098	0	3.97511



Рис. 7. Фотофиксация проведения эксперимента



Рис. 8. Двухканальный вибронализатор

С помощью указанной аппаратуры были построены графики спектральной

плотности, примеры которых представлены на рис. 9.

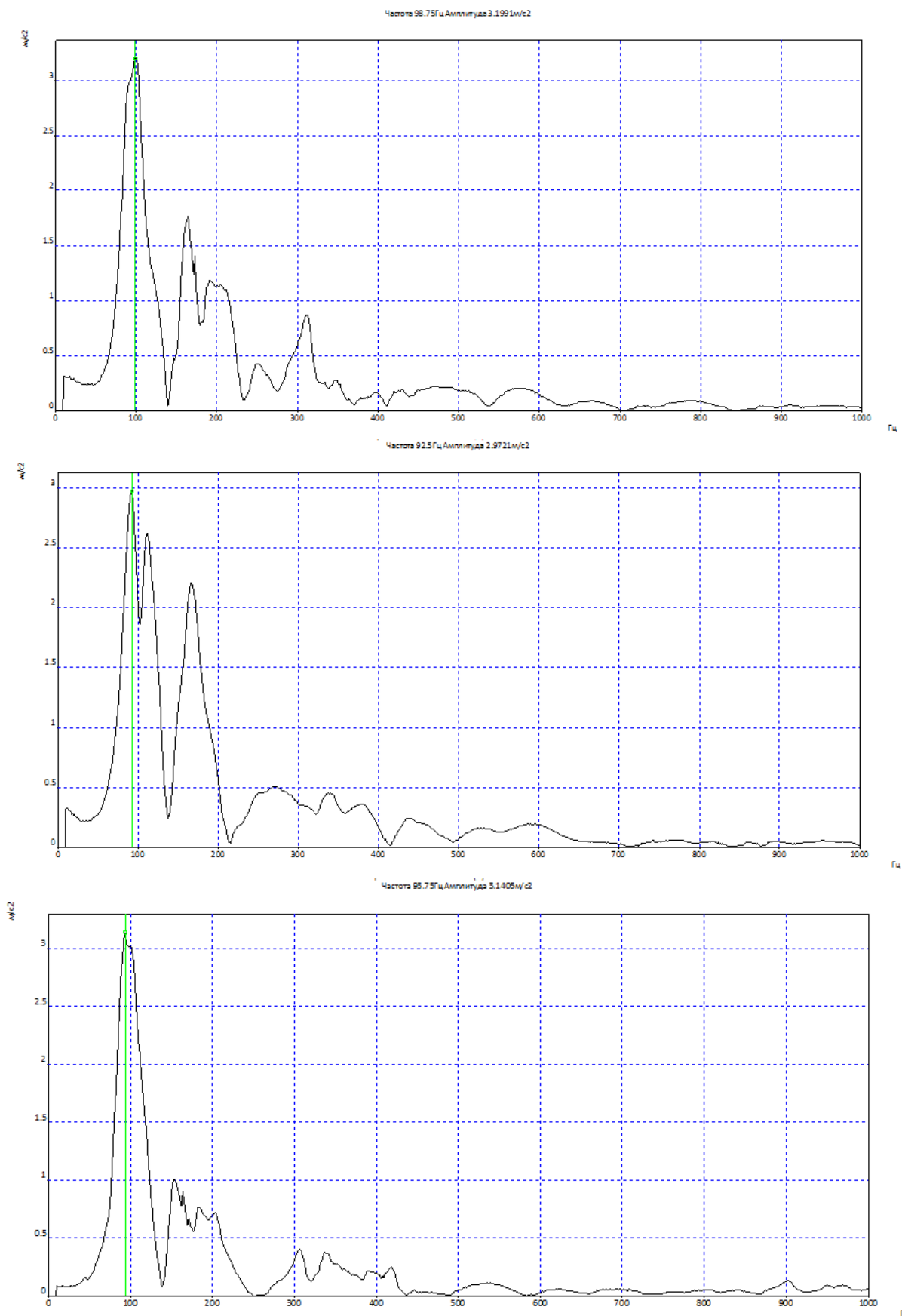


Рис. 9. Графики спектральной плотности

Выводы. В данном исследовании проведено численное моделирование специальной оболочечной системы. На базе построенной конечно-элементной модели проведен анализ напряженно-деформированного состояния конструкции, а также определены амплитудно-частотные характеристики и формы собственных колебаний. Конечно-элементная модель верифицирована натурным экспериментом.

Сопоставление результатов эксперимента с расчетной моделью показало, что в целом эксперимент показал удовлетворительную, для инженерных расчетов, точность. Определить частоту основного тона не удалось ввиду малости

прикладываемого возмущения, малого веса, большой жесткости конструкции и ряда других факторов. Однако характер полученных экспериментальным путем данных коррелирует с данными, полученными программным путем.

В дальнейшем для экспериментального определения амплитудно-частотных характеристик конструкции рекомендуется использовать устройство для генерации возмущения постоянной силы с целью его учета в расчетной модели.

В заключении следует отметить, что подобного рода конструкции нуждаются в углубленном изучении для уточнения алгоритмов и методов их расчета.

Список использованных источников

1. Зильберберг, С. Д. Эффективные хранилища из легких арочных металлических конструкций [Текст] / С. Д. Зильберберг, К. А. Огайка, В. П. Федорова // Пром. Стр-во: ежемесячный науч.-техн. и произв. журн. – М., 1988. – Вып. 11. – С. 21-23.
2. Білик, А. С. Визначення геометричних характеристик холодноформованих тонкостінних аркових профілів [Текст] / А. С. Білик, М. В. Лапонов // Зб. наук. праць. – К. : Укр. ін-т сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського, 2012. – Вип. 9, – С 193-203.
3. Жабинский, А. Н. Моделирование арковых покрытий з тонкостінних холодногнутих профілів / А. Н. Жабинский, А. Ф. Старовойтов // Зб. наук. праць. – Мінськ : Технічне нормування, стандартизація та сертифікація в будівництві, 2012. – Вип. 5. – С. 20-28.
4. Кузнецов, И. Л. Причины обрушения бескаркасного арочного сооружения пролетом 30 м [Текст] / И. Л. Кузнецов, А. В. Исаев, Л. Р. Гимранов // Известия КГАСУ: ежемесячный науч.-техн. журн. – Казань : ФГОУВО КГАСУ, 2011. – Вып. 4, – С 166-171.
5. Арменский, М. Ю. Эффективные хранилища из легких арочных металлических конструкций [Текст] / М. Ю. Арменский, И. И. Ведяков, П. Г. Еремеев // Пром. и гражданское стр-во: ежемесячный науч.-техн. и произв. журн. – М., 2007. – Вып. 3. – С. 16-18.
6. Сталеві конструкції. Норми проектування [Текст] : ДБН В.2.6-198:2014 [Чинний від 01.01.2015]. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2014. – 205 с.
7. Настанова з проектування конструкцій будинків із застосуванням сталевих тонкостінних профілів [Текст] : ДСТУ-Н Б В.2.6-87:2009 [Чинний від 01.08.2010]. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2010. – 55 с.
8. ТУ 527200-028-87168171-2012 «Бескаркасные арочные сооружения (конструкции) из прямых и арочных гнутых профилей 305А; 305П, производимых на оборудовании «Радуга-Кровля» выше отметки 0.000» [Текст]. – Тамбов : ООО «Стальпроект», 2012. – 39 с.
9. Городецкий, А. С. Информационные технологии расчёта и проектирования строительных конструкций [Текст] / А. С. Городецкий, В. С. Шмуклер, А. В. Бондарёв. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2003. – 248 с.
10. Моссаковский, В. И. Контактные задачи теории оболочек и стержней [Текст] / В. И. Моссаковский, В. С. Гудрамович, Е. М. Макеев. – М. : Машиностроение, 1978. – 507 с.

11. Eccher G., Rasmussen K.J.R., Zandonini R. Geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled structures [Text] // Thin-Walled Structures. – 2009. – Vol. 47. – P. 219–232.

12. Власов, В. З. Избранные труды. Общая теория оболочек [Текст] / В. З. Власов. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – Т. 1. – 528 с.

Резник Петро Аркадійович, канд. техн. наук, старш. викладач Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. E-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua. Тел. +38 (050) 615-86-38.
Коренев Роман Валерійович, аспірант Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. E-mail: r.v.korr@gmail.com. Тел. +38 (098) 358-99-07.

Резник Петр Аркадиевич, канд. техн. наук, старш. преп. Харьковского национального университета городского хозяйства им. А. Н. Бекетова. E-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua. Тел. +38(050)615-86-38.
Коренев Роман Валерьевич, аспирант Харьковского национального университета городского хозяйства им. А. Н. Бекетова. E-mail: r.v.korr@gmail.com. Тел. +38(098)358-99-07.

Reznik Petro, PhD, senior lecturer, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.
E-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua. Tel. +38(050)615-86-38.
Koreniev Roman, PhD Student, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.
E-mail: r.v.korr@gmail.com. Tel. +38(098)358-99-07.

Статтю прийнято 22.05.2018 р.

УДК 666.9.017-022.532

ВЛИЯНИЕ НАНОДОБАВОК НА ГИДРАТАЦИЮ ГИПСОВЫХ ВЯЖУЩИХ

Д-р техн. наук **В. Н. Деревянко** (ГВУЗ «ПГАСА»), канд. техн. наук **А. Н. Гришко** (ДГАЭУ), асп. **В. Ю. Мороз** (ГВУЗ «ПГАСА»)

ВПЛИВ НАНОДОБАВОК НА ГІДРАТАЦІЮ ГІПСОВИХ В'ЯЖУЧИХ

Д-р техн. наук **В. М. Дерев'янка** (ДВНЗ «ПДАБА»), канд. техн. наук **Г. М. Гришко** (ДДАЕУ), асп. **В. Ю. Мороз** (ДВНЗ «ПДАБА»)

THE EFFECT OF NANOADDITIVES ON THE HYDRATION OF GYPSUM BINDING AGENTS

Dr. sc. sciences V. N. Derevianko, phd. techn. H. M. Hryshko, sciences pg.W. Yu. Moroz

В статье представлены результаты исследования направления наномодификации минеральных вяжущих веществ, содержащие механизмы структурообразования и процесс гидратации гипсовых вяжущих. Экспериментально установлено, что во время роста кристаллы частично прорастают друг в друга и образуют пространственную сеть, пронизывающую и связывающую весь гипсовый камень в единое целое, за счет чего происходит увеличение прочности на сжатие гипса до 30 %.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, полугидрат сульфата кальция, гипсовые вяжущие, наномодификаторы, гидратация, прочность.

У статті подано результати дослідження процесів гідратації будівельного гіпсу в присутності вуглецевих нанотрубок (ВНТ). Модифікація гіпсу багатощаровими ВНТ призводить до збільшення його міцності на стиск. Експериментально встановлено, що при вмісті нанотрубок 0,18 % спостерігається приріст міцності до 30 %. Хімічна функціоналізація поверхні вуглецевих нанотрубок сприяє зниженню седиментаційного ефекту, властивого наночастинкам, дає змогу більш рівномірно диспергувати наноструктури по всьому об'єму модифікованого матеріалу і забезпечує хімічну взаємодію між нанотрубкою і матрицею речовини.

Методами квантово-хімічного аналізу підтверджується, що взаємодія молекули двоводного гіпсу з графеноподібною поверхнею є хімічним процесом. Підвищення міцності гіпсового композита, що містить ВНТ, обумовлене прискореним процесом кристалізації двоводного гіпсу поблизу графенової поверхні. Таким чином, можна припустити, що ВНТ є центрами кристалізації в гіпсовому композиті.

Аналіз мікроструктури зразків гіпсової композиції показав, що без модифікувальної добавки утворюється крихка структура гіпсових зразків зі значною кількістю пор. Можна, припустити, що нанодисперсні добавки ВНТ відіграють роль «центрів кристалізації», по поверхні яких відбувається структурування гіпсової матриці з досягненням підвищення міцності гіпсової композиції. Це пов'язано з тим, що під час росту кристали частково проростають одне в одне і утворюють просторову мережу, що пронизує і зв'язує весь гіпсовий камінь в єдине ціле.

Ключові слова: вуглецеві нанотрубки, напівгідрат сульфату кальцію, гіпсові в'язучі, наномодифікатори, гідратація, міцність.

The results of investigation of hydration processes of gypsum with carbon nanomodifiers are presented in the article. Gypsum modification by multilamellar carbon nanotube (CNT) results in the improvement of its compression strength. Experiments proved that at the nanotubes content of 0,18 %, strength improvement by up to 30 % is observed. Chemical functionalization of carbon nanotube surface facilitates the reduction of the sedimentation effect inherent to the nanoparticles, enables more uniform nanostructure dispersion throughout the modified material volume and provides the chemical interaction between nanotubes and the substance matrix.

Quantum-chemical analysis methods confirm that the interaction of calcium sulfate dihydrate molecule with the dihydrate -like surface is the chemical process. The improvement of CNT-containing gypsum composite strength is due to the accelerated process of calcium sulfate dihydrate crystallization at the graphene surface. Therefore, it may be assumed that CNTs act as "crystallization nuclei" in the gypsum composite.

The analysis of the microstructure of gypsum composition samples showed that without the modifying additive, loose structure of the gypsum samples is formed with a significant number of pores. It may be assumed that nanodispersed CNT additives act as "crystallization nuclei" on the surface of which calcium sulfate matrix structuring occurs with the improvement of the gypsum composition structural characteristics. This is due to the fact that during growth, crystals partly penetrate into each other and form three-dimensional network permeating and incorporating the entire gypsum stone into a body.

Keywords: carbon nanotubes, sulfate calcium hemihydrate, gypsum binder, nanomodifiers, hydration, strength.

Введение. В настоящее время нанотехнологии в строительном материаль-

эмпирический материал начинает трансформироваться в научные концепции и алгоритмы. Успешное применение

нанодобавок в других отраслях побуждает проводить исследования по их влиянию на процессы гидратации минеральных вяжущих материалов. Одним из фактором влияния на процессы гидратации является избыточная поверхностная энергия на границе раздела фаз в системе «вяжущие – затворитель».

Анализ последних исследований и публикаций. Авторами работ [1-3] исследовано влияние основных факторов на гетерогенную нуклеацию и показано, что указанные факторы формируют три механизма влияния первичных наноматериалов на структурообразование материала.

Рассмотрены основные методы получения изолированных наночастиц, ультрадисперсных порошков и компактных нанокристаллических материалов. Подробно обсуждены размерные эффекты в изолированных наночастицах и компактных нанокристаллических материалах, показана важная роль границ раздела в формировании структуры и свойств наноматериалов. Проведен анализ модельных представлений, объясняющих особенности строения и свойства веществ в нанокристаллическом состоянии [1-3].

Также рассмотрены различные методы получения ультрадисперсных (нано-) материалов – механические, физические, химические, биологические. Обобщены современные представления об электрических, магнитных, тепловых, оптических, диффузионных, химических и механических свойствах наноматериалов [1]. Подчеркнута и продемонстрирована зависимость этих свойств от структуры материала и геометрических размеров наночастиц.

Поэтому исследования, направленные на изучение влияния и механизма процесса гидратации гипсовых вяжущих в присутствии наномодификаторов, являются актуальными.

Определение цели и задач исследований. Целью исследований есть изуче-

ние влияния нанодобавок на гидратацию гипсовых вяжущих. В процессе проведения исследования были поставлены следующие задачи: 1. Исследовать диспергацию модификатора в объеме вяжущего, его влияния на структуру и свойства. 2. Изучить влияние наномодификаторов на процесс гидратации гипсовых вяжущих.

Основная часть исследования. В наших исследованиях были использованы: углеродные наночастицы (УНЧ), углеродные нанотрубки (УНТ), функционализированные (УНТ-ОН, УНТ-СООН). Для повышения эффективности углеродных нанотрубок (УНТ) проводили химическую модификацию поверхности УНТ функциональными группами, например, гидроксильной или карбоксильной [4]. Карбоксилация осуществлялась путем их взаимодействия с различными окислительными агентами [4-6] (соли хрома, марганца в высших степенях окисления, пероксид водорода). Для окисления УНТ гидроксильными группами применялся механохимический метод [7-8], который заключается в совместном помолу УНТ и щелочи в течение 60 минут.

При проведении исследований использовались образцы строительного гипса: контрольный, гипсовое вяжущее немодифицированное и модифицированное углеродными нанотрубками. За контрольный образец было принято гипсовое вяжущее с добавкой пластификатора поликарбоксилата П-11 научно-производственного предприятия «Макромер» (г. Владимир, Россия) (ПАВ) 0,4 %. Также в исследованиях был использован пластификатор Sika Retarder (Швейцария). Контроль приготовления суспензии проводился по таким показателям: устойчивость коллоидной системы (определение дзета-потенциала [9]), плотность суспензии, концентрация УНТ, вязкость.

На начальном этапе была исследована диспергация модификатора в объеме

вяжущего, его влияние на процесс гидратации, структуру и свойства.

Диспергацию проводили в среде: УНТ – вода. УНТ вводились в раствор

пластификатора и воды и обрабатывались с помощью ультразвука в дезинтеграторе. На рис. 1 приведена интегральная кривая осаждения.

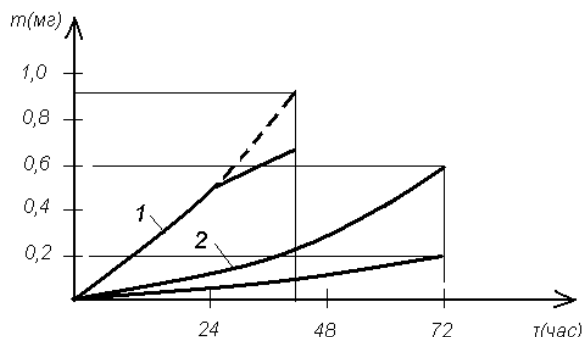


Рис.1. Интегральная кривая осаждения:

1 – УНТ – вода; 2 – УНТ – пластификатор – вода; 3 – УНТ-ОН – пластификатор – вода

Оценить качество полученного нанокompозита по коэффициенту однородности, неоднородности и т. д. довольно сложно. Использование дзета-потенциала или коэффициента проницаемости также не дает точного результата, а главное, не может быть экспресс-методом.

Влияние наномодификаторов на процесс гидратации гипсового вяжущего изучали, исследуя изменения температуры матрицы (гипс строительный + + вода + пластификатор + УНТ), тепловыделение, изменение pH, скорость структурообразования (переход $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [10-12].

Процессы, происходящие в модифицированной матрице, изучались с помощью определения реологических свойств гипсовой пасты, сроков схватывания, калориметрических исследований.

При проведении калориметрических исследований частицы полугидрата гипса затворялись водой и не перемешивались. При этом частицы исходного вяжущего, независимо от разбавления водой, разделены малыми промежутками, и вследствие затруднения диффузии в жидкой фазе переходящие в раствор ионы

не успевают переместиться на большие расстояния.

Калориметрический анализ, который проводился при температуре 21°C , подтверждает, что при введении УНТ происходит ускорение реакции гидратации по сравнению с гипсовым вяжущим без добавок (рис. 2, 3). Это связано с интенсивной кристаллизацией $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ за счет введения наномодификатора с большой удельной поверхностью и высокой реакционной способностью.

Результаты исследования интенсивности (рис. 2, 3) гидратации полуводного гипса, модифицированного УНТ, свидетельствуют о возможности придания материалу необходимых свойств путем регулирования и управления технологическими процессами его твердения.

Анализ структуры модифицированного вяжущего не дает возможности установки закономерности влияния наномодификатора, хотя на электронных микрофотографиях заметны изменения (рис. 4). При этом анализ микроструктуры образцов (рис. 4) гипсовой композиции показал, что введение модификатора способствует уплотнению структуры (рис. 4, б, в).

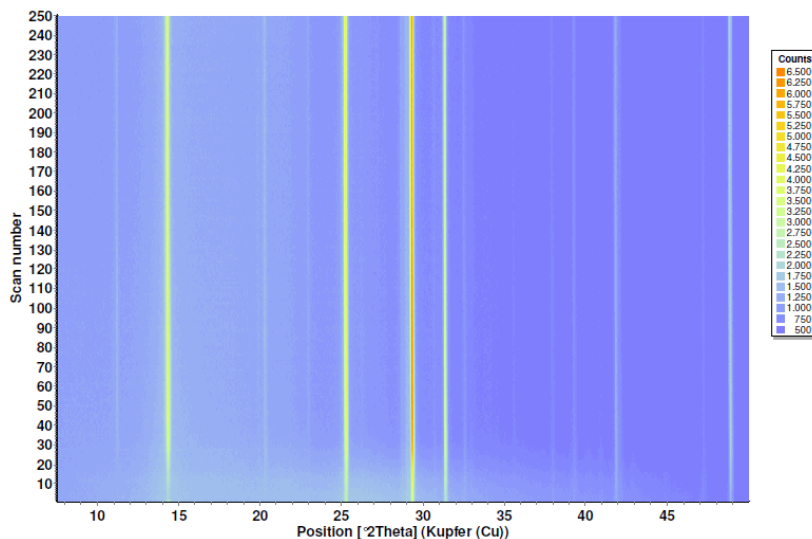


Рис. 2. Интенсивность в процессе гидратации полуводного гипса с добавкой пластификатора поликарбоксилата П-11

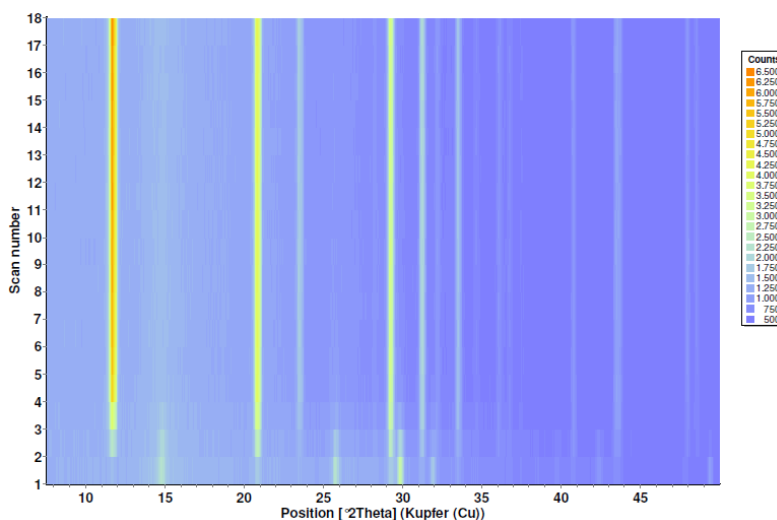


Рис. 3. Интенсивность в процессе гидратации полуводного гипса с добавкой пластификатора поликарбоксилата П-11, модифицированного УНТ

Проведенные исследования по определению предела прочности на изгиб и на сжатие образцов-балочек в возрасте двух часов показывают, что с увеличением содержания нанодобавки происходит повышение прочностных характеристик композиционного материала (см. таблицу).

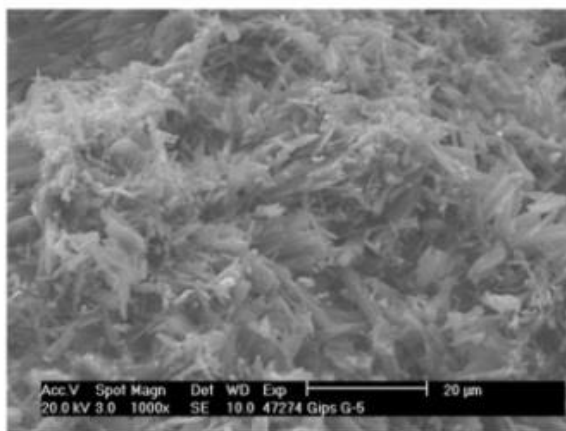
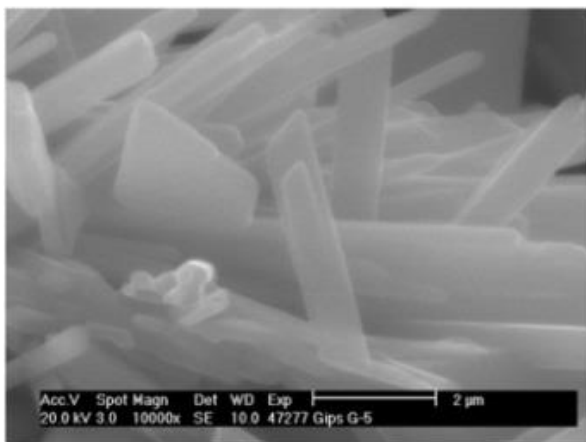
По прочностным показаниям наблюдается увеличение до 30 % при содержании модификатора 0,18 %. Водостойкость:

коэффициент размягчения – 0,3 до 0,5–0,6 в среднем.

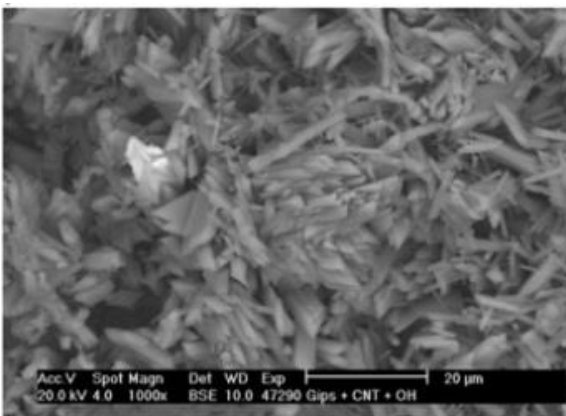
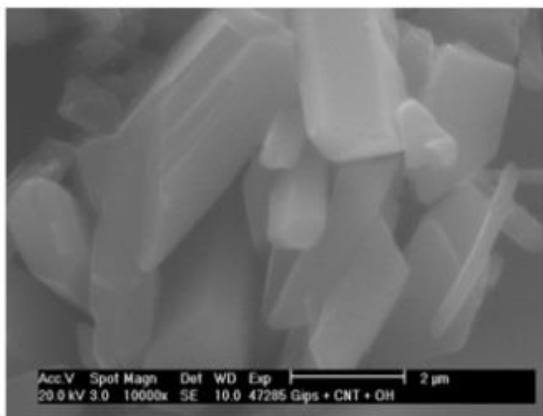
По утверждению А. А. Плугина и Х.-Б. Фишера [13], в твердении минеральных вяжущих прочность и водостойкость структуры обеспечивается сильным электростатическим притяжением двойных электрических слоев частиц. При введении в гипс минеральной добавки с отрицательным электрическим поверхностным зарядом и

электроповерхностным потенциалом кристаллы двуводного гипса растут от

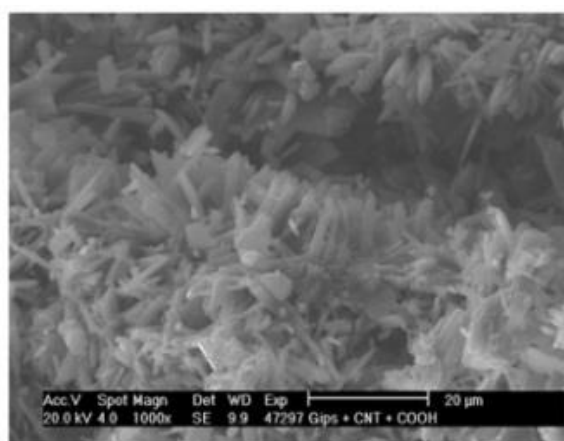
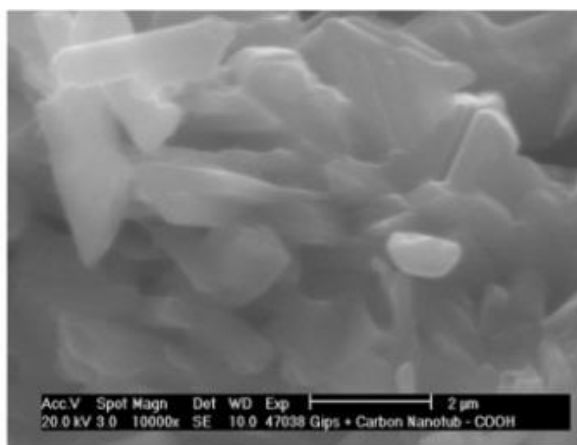
поверхности частиц. Это обеспечивает дополнительное повышение водостойкости.



а



б



в

Рис. 4. Микрофотографии гипсовой композиции:
а – без добавления УНТ; б – с добавлением УНТ-ОН; в – с добавлением УНТ-СООН

Таблица

Свойства гипсового вяжущего, модифицированного многослойными углеродными нанотрубками с функциональными группами

№ п/п	% ПАВ	% УНТ	В/Г, %	Сроки схватывания, мин		Прочность, МПа		Коэффициент размягчения
				начало	конец	сжатие	изгиб	
– COOH								
1	0,4	–	58	16	24	5,5	3,2	0,35
2	0,4	0,015	58	9	13	8,0	3,85	0,55
3	0,4	0,035	58	8	13	8,1	3,6	0,52
4	0,4	0,09	58	8	12	8,45	3,95	0,6
5	0,4	0,18	58	11	17	7,86	3,6	0,45
– OH								
1	0,4	–	58	16	24	4,6	2,1	0,3
2	0,4	0,015	58	9	13	5,6	2,2	0,33
3	0,4	0,035	58	8	13	5,9	2,2	0,37

Методами квантово-химического анализа подтверждается взаимодействие молекулы двуводного гипса с графеноподобной поверхностью (рис. 5).

Проведенный расчет взаимодействия молекулы двуводного гипсового вяжущего

с поверхностью УНТ показал, что через ион кальция молекула склонна к химическому взаимодействию с поверхностью в результате перекрывания валентных 3p орбиталей Ca^{2+} и 2p орбиталей углерода [14] (рис. 5).

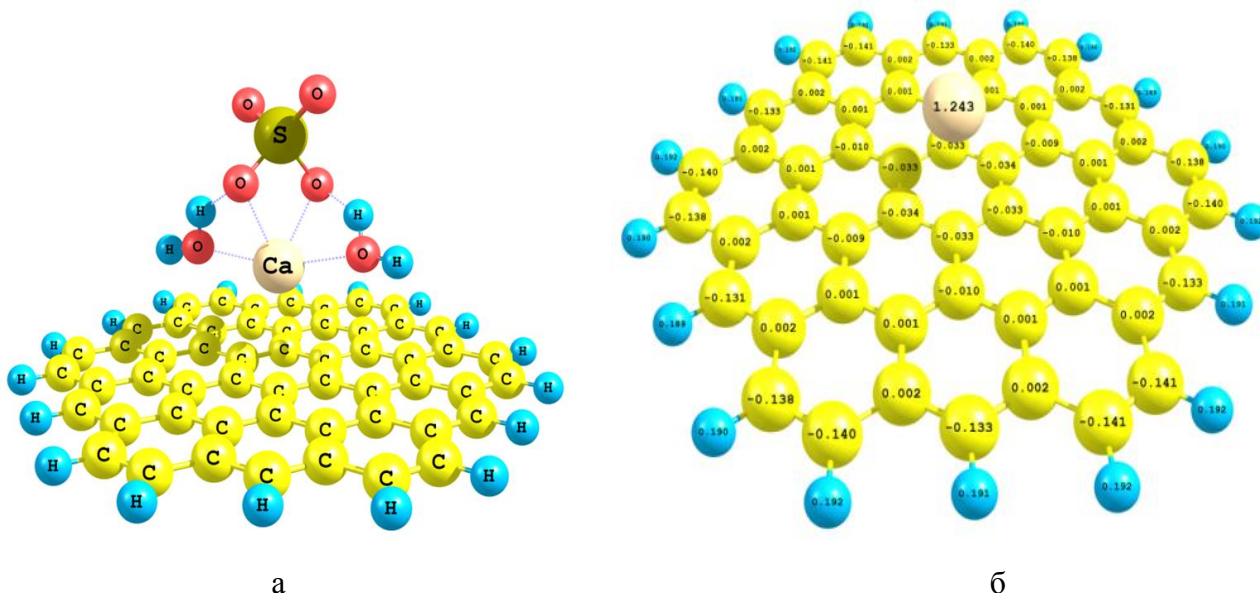


Рис. 5. Модельные фрагменты поверхности УНТ, взаимодействующие: с молекулой гипса (а); ионом Ca^{2+} (б)

На основе проведенных расчетов установлено, что при химическом взаимодействии молекулы $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с графеноподобной поверхностью значительно изменяется заряд иона Ca^{2+} (около 17 % по сравнению с исходным), а заряды остальных атомов изменяются не более чем на 2 %. Это позволяет сделать вывод о незначительном изменении химической активности периферийных атомов молекулы, участвующих в межмолекулярных взаимодействиях в кристалле двуводного гипса. Поэтому повышение прочностных показателей гипсового вяжущего, модифицированного УНТ, происходит в результате ускорения процессов кристаллизации двуводного гипса вблизи графеновой поверхности.

Выводы. Модифицирование гипса многослойными УНТ приводит к увеличению его прочности на сжатие. Экспериментально установлено, что при содержании нанотрубок 0,18 % наблюдается прирост прочности до 30 %.

Химическая функционализация поверхности углеродных нанотрубок способствует снижению седиментационного эффекта, присущего наночастицам, позволяет более равномерно диспергировать наноструктуры по всему объему модифицируемого материала и обеспечивает химическое взаимодействие между нанотрубкой и матрицей вещества.

Методами квантово-химического анализа подтверждается, что взаимодей-

ствие молекулы двуводного гипса с графеноподобной поверхностью является химическим процессом. Повышение прочности гипсового композита, содержащего УНТ, обусловлено ускоренным процессом кристаллизации двуводного гипса вблизи графеновой поверхности. Таким образом, можно предположить, что УНТ являются центрами кристаллизации в гипсовом композите.

Исходя из данных калориметрических исследований, при введении УНТ интенсифицируется процесс гидратации, наблюдается более полный переход полуводного гипса в двуводный, обеспечивается повышение физико-механических показателей гипсовой матрицы.

Анализ микроструктуры образцов гипсовой композиции показал, что без модифицирующей добавки образуется рыхлая структура гипсовых образцов со значительным количеством пор.

Возможно предположить, что нанодисперсные добавки УНТ играют роль «центров кристаллизации», по поверхности которых происходит структурирование гипсовой матрицы с достижением повышения прочностных характеристик гипсовой композиции. Это связано с тем, что во время роста кристаллы частично прорастают друг в друга и образуют пространственную сеть, пронизывающую и связывающую весь гипсовый камень в единое целое.

Список использованных источников

1. Cheng, C. Functional graphene nanomaterials based architectures: biointeractions, fabrications, and emerging biological applications [Text] / Chong Cheng, Shuang Li, Arne Thomas, Nicholas A. Kotov, Rainer Haag // *Chemical Reviews*. – 2017. – Vol. 117 (3). – Iss. 3. – P. 1826-1914.
2. Kang, J. Solution-Based Processing of Monodisperse Two-Dimensional Nanomaterials [Text] / Joohoon Kang, Vinod K. Sangwan, Joshua D. Wood, Mark C. Hersam // *Accounts of Chemical Research*. – 2017. – Vol. 50. – Iss. 4. – P. 943-951.
3. Петренко, Д. Б. Модифицированный метод Боэма для определения гидроксильных групп в углеродных нанотрубках [Электронный ресурс] / Д. Б. Петренко // *Электронный журнал «Вестник Московского государственного областного университета»*. Химия. – 2012. – № 1. – Режим доступа : www.evestnik-mgou.ru.

4. Хабаческу, В. Н. Ковалентная функционализация углеродных нанотрубок: синтез, свойства и применение фторированных производных [Текст] / В. Н. Хабаческу; пер. с англ. Е. Э. Григорьевой // Успехи химии. – 2011. – № 80(8). – С. 739-760.
5. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками [Текст] / Г. И. Яковлев, Г. Н. Первушин, А. Корженко [и др.] // Строительные материалы. – М., 2011. – № 2. – С. 47-51.
6. Бадамшина, Э. Р. Модифицирование углеродных нанотрубок и синтез полимерных композитов с их участием [Текст] / Э. Р. Бадамшина, М. П. Гафурова, Я. И. Эстрин // Успехи химии. – 2010. – № 79 (11). – С. 1028-1064.
7. Юдович, М. Е. Поверхностно-активные свойства наномодифицированных пластификаторов [Текст] / М. Е. Юдович, А. Н. Пономарев, С. И. Гареев // Строительные материалы. – 2008. – № 3. – С. 2-3.
8. Morsy, M. Synthesis and characterization of thermally stable carbon nano-tubes using ARC-Discharge technique [Text] / M. Morsy, S.A. Elkhodary, S.S. Shebl // Строительные материалы: Reports of the V International conference «Nanotechnology for Green and Sustainable Construction», March 23 - 25, Cairo. – 2012. – № 2. – С. 44-47.
9. Чумак, А. Г. Структура и свойства композиционного материала на основе гипсового вяжущего и углеродных нанотрубок [Электронный ресурс] / А. Г. Чумак // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – М. : ЦНТ «Наностроительство», 2013. – № 2. – С. 24-34. – Режим доступа : <http://www.nanobuild.ru>.
10. Carbone, M. Kinetics of gypsum dehydration at reduced pressure: an energy dispersive X-ray diffraction study [Text] / M. Carbone, P. Ballirano, R. Caminiti // European Journal of Mineralogy. – 2008. – Vol. 20. – № 4. – P. 621–627.
11. A crystallographic study of the low-temperature dehydration products of gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: hemihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$, and $\gamma\text{-CaSO}_4$ / G. A. Lager, Th. Armruster, F. J. Rotella, J. D. Jorgensen, D. G. Hinks // American Mineralogist. – 1984. – Vol. 69. – P. 910–918.
12. Бушуев, Н. Н. О структурных особенностях CaSO_4 [Текст] / Н. Н. Бушуев // Доклады Академии Наук СССР. Раздел «Кристаллография». – 1980. – Т. 255. – № 5. – С. 1104-1109.
13. Plugin, A A., Plugin O. A., Fisher H.-B., Shabanova G.N. Increase of gypsum waterresistance by mineral additives : Weimarer Gipstagung, 30-31 Marz 2011, Wiemar, Bundersrepublik Deutschland: Tagungsbericht. – Weimar: F.A. Finger-Institut fur Baustoffkunde, Bauhaus-Universitat Weimar, 2011 - N P21. – P.435-443.
14. Reshetnyak, V. V., Vaganov, V. E., Petrunin S. Y., Chumak A. G., Popov M.Yu., Interaction of calcium ions with carcass carbon structures. J. Construction, Materials Science, Mechanical Engineering 2013; 67:261–266.

Дерев'янюк Віктор Миколайович, д-р техн. наук, професор кафедри технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». Тел. +38 (0562) 47-16-22. E-mail: derev@mail.pgasa.dp.ua.

Гришко Ганна Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації гідромеліоративних систем і технології будівництва Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. Тел. +38 (0562) 713-51-37. E-mail: gryshko.anna0101@gmail.com.

Мороз Володимир Юрійович, аспірант кафедри технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». Тел. +38 (0562) 47-16-22. E-mail: Morozdnipro@ukr.net.

Дерев'янюк Віктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Государственного высшего учебного заведения «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры». Тел. +38(0562) 47-16-22. E-mail: derev@mail.pgasa.dp.ua.

Гришко Анна Николаевна, канд. техн. наук, доцент кафедры эксплуатации гидромелиоративных систем и технологии строительства Днепропетровского государственного аграрно-экономического университета. Тел. +38(0562) 713-51-37. E-mail: gryshko.anna0101@gmail.com.

Мороз Владимир Юриевич, аспирант кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций Государственного высшего учебного заведения «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры». Тел. +38(0562) 47-16-22. E-mail: Morozdnipro@ukr.net.

Derevianko Viktor Mykolaevich, Doct. of techn. Sciences, professor department of technology of construction materials, products and designs, State Institution of Higher Education “Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture”. Tel. +38 (0562) 47-16-22. E-mail: derev@mail.pgasa.dp.ua.

Hryshko Hanna Mykolayvna, Cand. of techn. Sciences, department of operation of hydromelioration systems and construction technology, Dnipropetrovsk State Agrarian-Economic University. Tel. +38 (0562) 713-51-37. E-mail: gryshko.anna0101@gmail.com.

Moroz Wladimir Yurievich, Postgraduate student, department of technology of construction materials, products and designs, State Institution of Higher Education “Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture”. Tel. +38 (0562) 47-16-22. E-mail: Morozdnipro@ukr.net.

Статтю прийнято 15.03.2018 р.

УДК 624.012.3/.4.21.095

ВПЛИВ ПРОФІЛЮ ШПОНОК ТА ШИРИНИ ШВА НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ З'ЄДНАНЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ У ТРАНСПОРТНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Кандидати техн. наук **О. О. Довженко, В. В. Погрібний, студ. Є. І. Чумак (ПолтНТУ)**

ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ ШПОНОК И ШИРИНЫ ШВА НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ТРАНСПОРТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Кандидаты техн. наук **О. А. Довженко, В. В. Погребной, студ. Е. И. Чумак (ПолтНТУ)**

JOINT SHAPE AND SEAM WIDTH INFLUENCE ON THE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES CONNECTION BEARING CAPACITY IN TRANSPORT CONSTRUCTION

Phd. tehn., **О. О. Dovzhenko, Ph.D., phd. tehn., V. V. Pohribnyi, stud. E. I. Chumak**

Наведено результати експериментальних досліджень шпонкових з'єднань залізобетонних елементів. Визначено вплив на несучу здатність стиків форми шпонкового профілю та ширини шва. Найбільшу міцність мають стики з трикутним профілем, при цьому характер руйнування шляхом зрізу за різної форми шпонок залишається незмінним. Збільшення ширини шва зменшує несучу здатність стиків та змінює характер їх руйнування. Встановлено конструктивні параметри, що забезпечують ефективну роботу з'єднань.

Ключові слова: шпонка, з'єднання, фактори впливу, форма профілю, ширина шва, несуча здатність.

Изложены результаты экспериментальных исследований шпоночных соединений. Определено влияние на несущую способность стыков формы шпоночного профиля и ширины шва. Наибольшую прочность имеют стыки с треугольным профилем, при этом характер разрушения соединений путем среза не зависит от формы шпонок. Увеличение ширины шва снижает несущую способность стыков и изменяет характер их разрушения. Установлены конструктивные параметры, обеспечивающие эффективную работу соединений.

Ключевые слова: шпонка, соединения, факторы влияния, форма профиля, ширина шва, несущая способность.

The reinforced concrete elements keyed joints three series experimental research results are presented. In the first series, one-keyed contact joints with rectangular, trapezoidal and triangular keys were investigated with key depth to the height ratio $l_k/h_k = 0,5$. The keys were reinforced in the shear plane in the height middle and in the two levels. The reinforcement yield strength was $f_{yw} = 210 \dots 260$ MPa, the reinforcement percentage was $\rho = 0 \dots 2,89\%$. The second series included single-keyed joints with rectangular keys and different seam widths $t_j = 25, 50, 100, 150, \text{ and } 200$ mm. The key size ratio was $l_k/h_k = 0,25$ and $0,5$. The keys were reinforced in the shear plane in their height middle (2Ø8), the reinforcement yield strength was $f_{yw} = 240 \dots 260$ MPa. The third series consisted of three-keyed joints, which varied: the joints supporting surface inclination angle, the joints width $t_j = 25, 50, 100, 150, 200$ mm and 300 , the number and the placing character on the key height. The keyed profile shape (rectangular, trapezoidal, triangular) and the seam width influence on the joints bearing capacity is determination. The stress-strain state, the crack formation character and the experimental models destruction are studied. It is established that the keyed supporting surfaces slope angle does not change their destruction character, but it affects the resistance value to destruction. The joints with a triangular profile have the greatest strength, and the joints with a rectangular profile have a smallest strength (the difference is up to 15%). Increasing the seam width reduces the joints bearing capacity and changes their destruction character. For single-keyed joints, there is a destruction on the key or seam. For three-keyed joints combinational destruction variants of are also observed. The limit load for three-keyed test specimens with a trapezoidal profile with an increase t_j is reduced to 20%. The joints design parameters are established, which ensure their effective work.

Key words: Key, connection, influence factors, profile shape, seam width, bearing capacity.

Вступ. Однією із сучасних розробок у галузі мостобудування є споруди із постнапруженими сегментними коробчастими ригелями [1]. На відміну від «класичних» монолітних конструкцій, сегментний міст складається з великої кількості «малих» збірних елементів. Поведінка таких мостів в умовах експлуатації і в граничному стані в значній мірі залежить від роботи стиків між сегментами. Через дію значних зрізувальних сил найбільш ефективними є в цьому випадку шпонкові стики, що мають підвищений опір зсуву [2]. Крім створення

складених перерізів збірних і збірно-монолітних конструкцій [3], вони також застосовуються при реконструкції автодорожніх мостів. Відомий спосіб розширення останніх накладною плитою, яка об'єднується з плитою існуючої пролітної частини за допомогою анкерно-шпонкового стику. Зазначене вказує на те, що шпонкові з'єднання широко використовуються в транспортному будівництві і потребують подальшого детального вивчення.

Ефективність конструктивних рішень з'єднань значною мірою залежить від

точності обліку при їх проектуванні визначальних факторів міцності. На несучу здатність шпонкових з'єднань впливає клас і вид бетону, величина їх обтиснення та відсоток армування. Щодо питання якісного характеру впливу зазначених факторів у дослідників існує єдина точка зору, що відрізняється лише в кількісній оцінці. Що не можна сказати про залежність опору руйнуванню від ряду геометричних параметрів стиків, а саме: відношення глибини шпонки до її висоти, форми профілю (кута нахилу навантаженої грані шпонки) і ширини шва. Неповний облік геометричних характеристик часто призводить до необґрунтованих запасів несучої здатності і суттєвого підвищення матеріаломісткості з'єднань. Дана робота присвячена аналізу впливу цих факторів. Особлива увага приділяється двом останнім.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження [4–8] свідчать про вплив форми шпонкового профілю на несучу здатність з'єднань бетонних і залізобетонних елементів. Встановлено підвищення величини граничного навантаження армованих і обтиснутих трапецієподібних і трикутних шпонок у порівнянні з прямокутними. Разом з тим у [9, 10] цим фактором нехтується. Щодо залежності міцності з'єднання від ширини шва у дослідників також немає спільного бачення. Аналіз досліджень [11] не вносить однозначності у розв'язання даного питання. Так, поряд з твердженням про значне зниження несучої здатності при збільшенні ширини шва, можна почути думку про неістотність такого впливу. Зазначене зумовлює необхідність отримання нових результатів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даного дослідження є удосконалення конструктивних рішень шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів на основі експериментального вивчення впливу форми шпонкового профілю і ширини шва

на несучу здатність з'єднань і аналізу результатів їх поєднання з іншими значущими факторами.

Основна частина дослідження. За останні 30 років у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка проведено системні дослідження шпонкових з'єднань бетонних і залізобетонних елементів. Встановлено, що на роботу стиків впливає цілий ряд факторів [12].

Отримані дані підтверджують те, що характер руйнування шпонок у першу чергу залежить від співвідношення їх глибини і висоти. При $l_k/h_k = 0,1 - 0,2$ в дослідах спостерігається зминання під майданчиком навантаження з відколюванням частини елемента уздовж похилої площини (реалізується зріз за похилою площиною). Зразки з $l_k/h_k = 0,3 - 0,5$ руйнуються за цілим бетонним, наближеним до нормального, перерізом, розташованим поблизу площини зрізу. При $l_k/h_k = 0,6$ руйнування шпонок має згинальний характер і відбувається крихко за розтягнутою зоною.

Обтиснення й армування шпонок, перешкоджаючи їх зміщенню в горизонтальному напрямку, розширює межі зсувної форми руйнування до $l_k/h_k = 1$ [12]. Спостерігається суттєве підвищення граничного навантаження із зростанням обтискування, що зазначається і в роботах [1, 5, 14]. Руйнування супроводжується зміщенням окремих частин з'єднань уздовж площини зрізу при досягненні напруженнями в арматурі межі текучості. Зі збільшенням ρ до 1,5 % міцність зразків зростає вдвічі, що підтверджується в [11, 15]. Значення граничного навантаження шпонок із арматурою, розташованою у два яруси за висотою, були приблизно на 10 % більші в порівнянні зі шпонками з її центральним розміщенням.

Для оцінки впливу на несучу здатність шпонкового профілю і ширини

шва було виготовлено і випробувано три серії дослідних зразків.

У першій серії досліджувалися одношпонкові контактні стики з прямокутними, трапецієподібними і трикутними шпонками при $l_k/h_k = 0,5$ (рис. 1). Вивчався вплив кута нахилу опорних граней шпонок на

несучу здатність з'єднань [11]. Шпонки армувалися в площині зрізу посередині їх висоти (2Ø8, 2Ø14, 2Ø16, 2Ø18) і у двох рівнях (4Ø10). Межа текучості арматури становила $f_{yw} = 210 \dots 260$ МПа, відсоток армування $\rho = 0 \dots 2,89$ % .

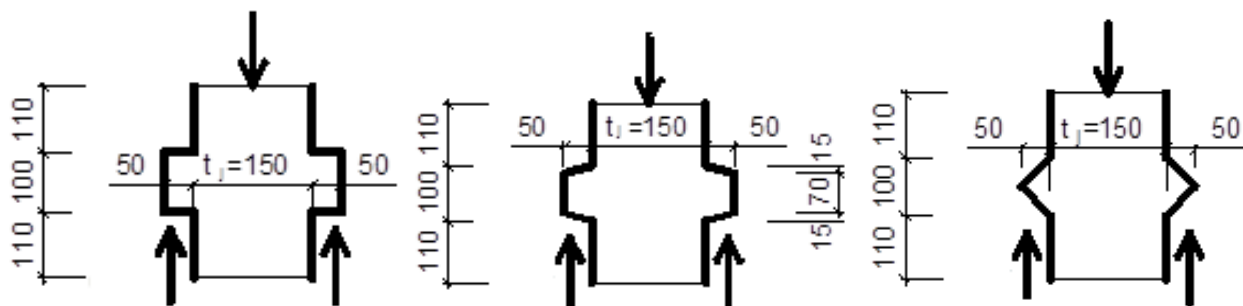


Рис. 1. Геометричні параметри одношпонкових стиків із різною формою шпонкового профілю

Друга серія включала одношпонкові з'єднання з прямокутними шпонками та різною шириною шва $t_j = 25, 50, 100, 150$ і 200 мм [12]. Тут було вивчено вплив t_j на граничне навантаження та характер руйну-

вання стиків при $l_k/h_k = 0,25$ (рис. 2) і $0,5$. Шпонки армувалися в площині зрізу посередині їх висоти (2Ø8), межа текучості арматури становила $f_{yw} = 240 \dots 260$ МПа.

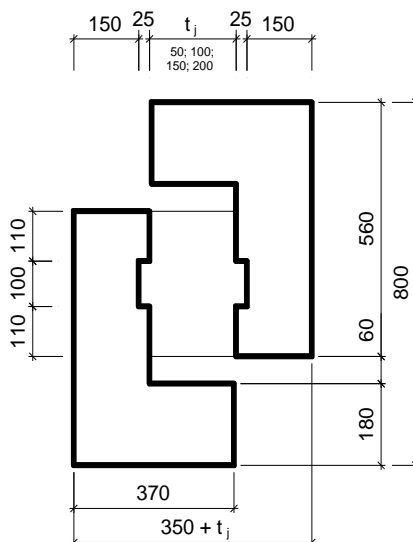


Рис. 2. Геометричні параметри одношпонкових стиків із різною шириною шва і $l_k/h_k = 0,25$

Третя серія дослідних зразків являла собою тришпонкові стики (рис. 3), в яких варіювалися такі параметри: кут нахилу опорної поверхні шпонок (прямокутна, трапецієподібна і трикутна шпонка),

ширина стиків $t_j = 25, 50, 100, 150, 200$ і 300 мм, кількість і характер розміщення арматури по висоті шпонки (3x2Ø8, 3x4Ø6, 3x2Ø12). Межа текучості арматури складала $f_{yw} = 280$ МПа.

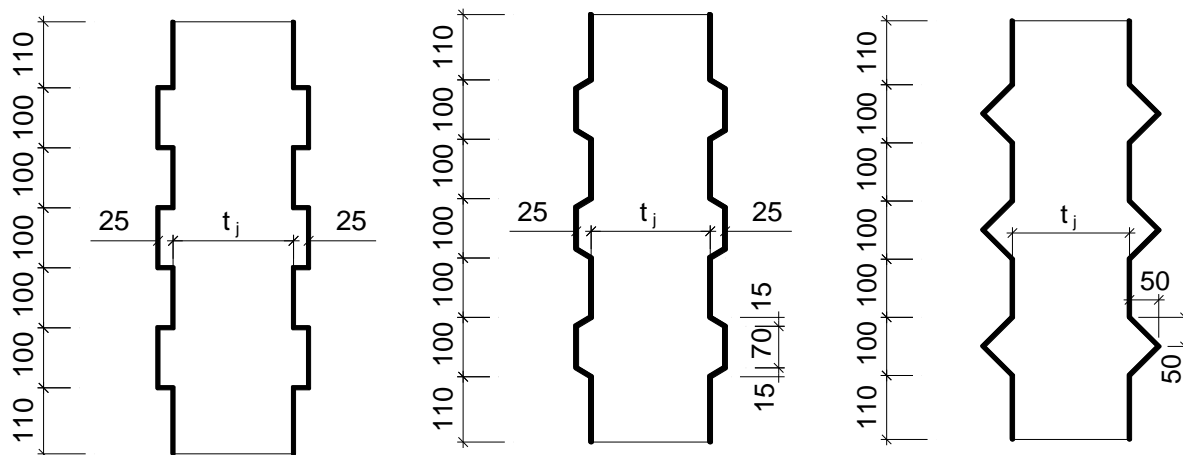


Рис. 3. Геометричні параметри тришпонкових стиків із різною шириною шва та формою шпонкового профілю

При випробуванні реалізовані як моментна, так і безмоментна схема навантаження. Технологію виготовлення зразків і схем передачі навантаження докладно описано в [13].

Випробування одношпонкових контактних стиків показали, що найбільшу

міцність мають шпонки з трикутним профілем, а найменшу – з прямокутним (різниця до 15 %). Кут нахилу опорних поверхонь шпонок не змінює характеру їх руйнування (рис. 4), але впливає на величину граничного навантаження.

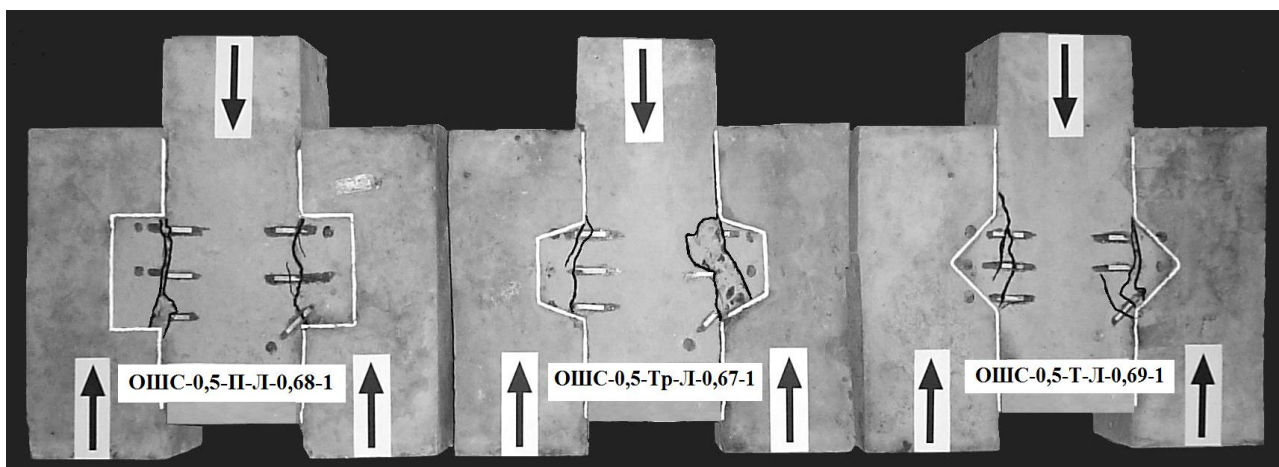


Рис. 4. Характер руйнування одношпонкових контактних стиків із різною формою шпонкового профілю

У ході випробування тришпонкових стиків з $\psi = 0 - 45^\circ$ підтвердилася найбільша міцність з'єднань з трикутними шпонками, аналогічні висновки отримані в [4, 15].

На думку авторів, це пояснюється зміною траєкторії головних нормальних стискальних напружень у результаті нахилу навантаженої грані шпонки, а також наявністю горизонтальної складової навантаження і включення в роботу арматури на більш ранніх етапах навантаження. Це призводить до ефекту обойми і домінуючого впливу зрізу в порівнянні з відривом (дії поперечної сили в порівнянні із згинальним моментом). Твердження про рівномірність трикутної і прямокутної шпонки пов'язані з включенням у вибірку для порівняльного

аналізу результатів випробувань прямокутних шпонок із різним співвідношенням розмірів, що призводить до значного розкиду міцності [2, 16] і, як наслідок обережної оцінки.

Для одношпонкових з'єднань із змінною шириною шва спостерігаються три випадки руйнування (рис. 5). При $t_j = 25$ мм реалізується зріз шпонки за вертикальним перерізом, в інтервалі $t_j = 50 \dots 100$ мм – зріз за похилою площиною шва в межах висоти шпонки; при $t_j = 150$ мм і 200 мм – похилі тріщини розповсюджуються за швом (від верхнього кута шпонки в міжшпонковий простір).

Зі збільшенням ширини шва міцність зразків знижується.

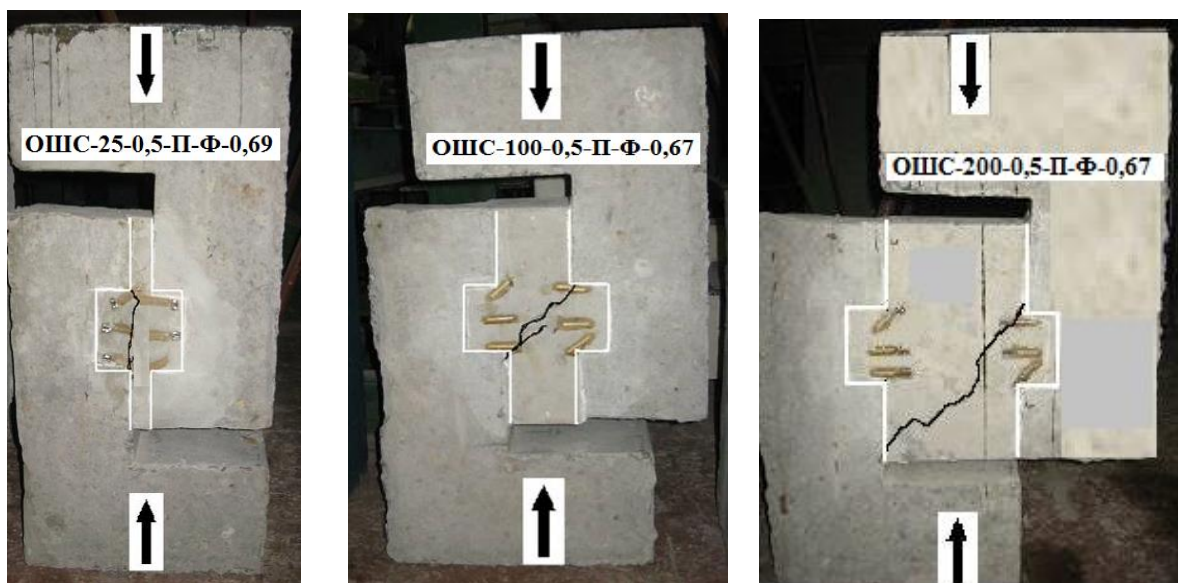


Рис. 5. Характер руйнування одношпонкових стиків із різною шириною шва при $l_k/h_k = 0,5$ і $\rho = 0,67 \dots 0,69$ %

Для тришпонкових з'єднань при $l_k/h_k = 0,25$ і відстані між шпонками, що дорівнює висоті шпонки h_k , залежно від t_j спостерігалися такі види руйнування (рис. 6):

- зріз трьох шпонок при ширині шва $t_j = 25$ мм;
- зріз двох шпонок з утворенням похилої тріщини в межах третьої при $t_j = 25, 50, 100$ мм;

- зріз крайньої шпонки з утворенням похилої тріщини в тілі стику в межах двох інших ($t_j = 150, 200$ мм);

- зріз по похилій площині в межах усієї висоти стику H_k при $t_j = 300$ мм, шпонки при цьому не руйнувалися.

Таким чином, ширина шва визначає характер руйнування і, як наслідок, суттєво впливає на граничне навантаження, яке, наприклад, для трапецієподібного профілю зі збільшенням t_j зменшується до 20 %.

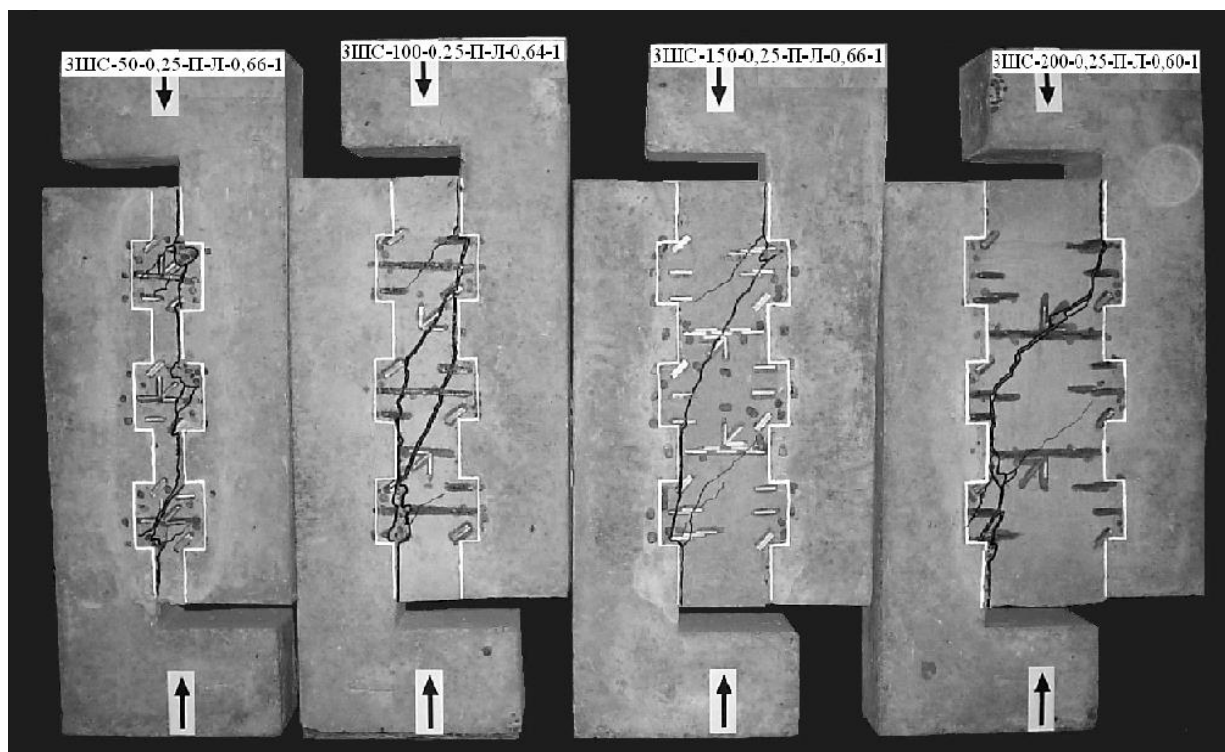


Рис. 6. Характер руйнування тришпонкових стиків із прямокутним профілем і шириною шва $t_j = 25, 50, 100, 200$ мм

Поверхні руйнування шпонок при зрізі складаються із ділянок розтягування і стиснення, розміри останніх зростають зі збільшенням величини обтискування і коефіцієнта армування.

При близьких до руйнівних навантажень, деформація бетону в зонах стиснення (біля нижніх вхідних кутів шпонок) досягала 2,5%. При цьому максимальні їх значення спостерігалися в зразках з більш високим рівнем обтискування, при більшому відсотку армування і з рознесеною за висотою шпонки арматурою.

Аналіз різниці деформацій на діаметрально протилежних сторонах арматурного стержня дає змогу зробити висновок про наявність нагельного ефекту в нижній арматурі при її двоярусному розташуванні.

Стержні верхнього ряду включаються в роботу на більш ранніх стадіях навантаження, ніж у зразках, армованих посередині перерізу.

Використання дисперсно-армованого поліпропіленовою фіброю бетону як матеріалу для виготовлення шпонкових стиків привели до зміни характеру

тріщиноутворення і руйнування зразків. Перші тріщини утворювалися при більш високих рівнях навантаження в порівнянні зі стиками з керамзитобетону, руйнування було більш пластичним, розтягнутим у часі.

Системність виконаних у ПолтНТУ комплексних досліджень дала змогу встановити якісний і кількісний вплив на несучу здатність з'єднань окремих факторів і отримати нову інформацію при їх поєднанні.

Аналіз результатів досліджень з'єднань дав можливість пояснити ряд існуючих неоднозначностей в оцінці впливу на міцність шпонкових з'єднань співвідношення ширини шва [13] до висоти шпонок і форми профілю [4, 6].

Експериментальну оцінку міцності шпонкових з'єднань, доповнену даними інших досліджень [1, 4, 5, 11, 13, 15, 16], теоретично обґрунтовано та підтверджено у роботах [17–20]. В основу запропонованої теорії розрахунку несучої здатності при зрізі покладені варіаційний метод у теорії пластичності, концепція жорстко-пластичного тіла і принцип віртуальних швидкостей [21, 22].

Висновки:

1. Значення граничного навантаження і характер руйнування бетонних шпонок (змінання, зріз, відрив) залежать від співвідношення їх глибини l_k до висоти h_k .
2. Обтиснення й армування істотно збільшують міцність шпонкових з'єднань (до 2,5 разу), розширюють межі зсувної

форми руйнування (до $l_k/h_k = 1$) і поряд з рознесенням арматури за висотою шпонки підвищують пластичні властивості бетону. На стадії, що передує руйнуванню стику, зафіксовано різке зростання деформації бетону й арматури.

3. При відношенні $l_k/h_k = 0,5$ максимальну міцність мають стики з трикутною формою шпонкового профілю (до 15 % більше в порівнянні з прямокутним).

4. Для одношпонкових зразків залежно від ширини шва в дослідах реалізуються: зріз шпонки за вертикальним перерізом (руйнування «за шпонкою»); зріз за похилим перерізом у межах висоти шпонки; руйнування з розповсюдженням похилої тріщини в простір між шпонками (руйнування «за швом»). Зі збільшенням ширини шва міцність стиків зменшується.

5. Застосування фібробетону підвищує тріщиностійкість з'єднань, характер руйнування змінюється з зовні крихкого на квазіпластичний.

6. Бетонні шпонки рекомендується проектувати прямокутними з відношенням глибини до висоти $0,25 \leq l_k/h_k \leq 0,5$, залізобетонні й обтиснуті – трапецієподібними на зазначеному інтервалі і трикутними з $l_k/h_k = 0,5$.

7. Шов пропонується передбачати завширшки $t_j \leq 1,5h_k$, з огляду при цьому на технологічні вимоги для даного типу з'єднання.

Список використаних джерел

1. Rombach, G. Precast segmental box girder bridges with external prestressing design and construction [Text] / G. Rombach // INSA Rennes Hamburg-Harburg Technical University, Germany. – 2002. – № 2. – P. 1-15.
2. Shamass, R. Finite-Element Analysis of Shear-Off Failure of Keyed Dry Joints in Precast Concrete Segmental Bridges [Text] / R. Shamass, X. Zhou and G. Alfano // Journal of Bridge Engineering. - 2015. - Vol. 20. - Iss. 6. 04014084 (12 P). (Scopus)
3. Araujo, D.L. Strength of shear connection in composite bridges with precast decks using high performance concrete and shear-keys [Text] / D. L. Araujo, M.K. Debs // Materials and Structures. – 2005. – Vol 38. - № 3. – P. 173-181. (Scopus)

4. Naotaka, Y. Study shear behavior of shear key on joints of precast concrete structure (Part 1. Summary and result of experiments) [Text] / Y. Naotaka, T. Norimono, K. Katori, S. Hayashi // J. Struct. Constr. Eng. – Architectural Institute of Japan. – 1997. – № 10. – P. 441-442.
5. Rizkalla, S.H. Multiple shear key connections for precast shear wall panels [Text] / S. H. Rizkalla, R. L. Serette, J. S. Heuvel, E. K. Attiogbe // PCI Journal. – 1989. – № 3–4. – P. 104-120. (Scopus)
6. Izni, S.I. Ultimate shear capacity and failure of shear key [Text] / S. I. Izni, H. P. Khairul, H. Mansoor, A. Bady, A. A. Saim, N. N. Sarbini // Malaysian Journal of Civil Engineering. - 2014. - Vol. 26(3). - P. 414-430.
7. Issa, M. A. Structural behavior of single key joints in precast concrete segmental bridges [Text] / M. A. Issa, H. A Abdalla // Journal of Bridge Engineering. - 2007. - Vol. 12. - Iss. 3. - P. 315-324. (Scopus).
8. Zhou, X. Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges [Text] / X. Zhou, N. Mickleborough, Z. Li // ACI Structural Journal. - 2005. - Vol. 102. - Iss. 1. - PP. 3-11. (Scopus).
9. 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.
10. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [Чинний від 2011-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2011. – 118 с. (Національний стандарт України).
11. Железобетонные стены сейсмостойких зданий. Исследование и основы проектирования [Текст] / Г. Н. Ашкинадзе, М. Е. Соколов, Л. Д. Мартынова [и др.]; под ред. Г. Н. Ашкинадзе и М. Е. Соколова. – М. : Стройиздат, 1988. – 504 с.
12. Dovzhenko, O. The bearing capacity experimental determination of the keyed joints models in the transport construction [Text] / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, I. Yurko, I. Shostak // Proc. of the 6th fib. International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Transbud-2017), Kharkiv, Ukraine, April 19-21, 2017. (Scopus)
13. Прочность и жесткость стыковых соединений панельных конструкций. Опыт СССР и ЧССР [Текст] / Е. Горачек, В. И. Лишак, Д. Пуме [и др.]; под ред. В. И. Лишака. – М. : Стройиздат, 1980. – 192 с.
14. Alcalde, M. Influencia del número de llaves en la resistencia a cortante de juntas secas postensadas [Influence of the number of keys on the shear strength of post-tensioned dry joints] [Text] / M. Alcalde, H. Cifuentes, F. Medina // Materiales de Construcción. – 2013. – Vol. 63 (310). – P. 297-307. (Scopus)
15. Norimono, T. Analytical study on relations between form and shear behavior of shear key on joints of precast concrete structure [Text] / T. Norimono, K. Katori, S. Hayashi // J. Struct. Constr. Eng., Architectural Institute of Japan. – 1996. – № 9. – P. 835- 836.
16. Экспериментальные исследования вертикальных шпоночных стыков железобетонных стеновых панелей с петлевыми гибкими связями [Текст] / И. С. Дербенцев, А. А. Карякин, С. А. Сонин, И. А. Бельдейко // Вестник ЮУрГУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2011. – № 35 (252). – С. 16-21.
17. Довженко, О. О. Порівняльний аналіз розрахунку міцності бетонних шпонок за існуючими методиками [Текст] / О. О. Довженко, Л. В. Карабаш, Ю. В. Чурса // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук праць. – Рівне : УДУВГП, 2012. – Вип. 23. – С. 201-210.

18. Довженко, О. О. Про можливість застосування теорії пластичності до розрахунку міцності елементів із високоміцного бетону [Текст] / О. О. Довженко, В. В. Погрібний, О. О. Куриленко // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – 2012. – № 105. – С. 74-82.

19. Довженко, О. А. Расчет прочности шпоночных соединений элементов перекрытия конструктивной системы «АРКОС» [Текст] / О. А. Довженко, В. В. Погребной, Ю. В. Чурса // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – № 2. – С. 70-74.

20. Mitrofanov, V. Strength of Concrete Elements Under Shear Action According to the Theory of Plasticity and Tests / V. Mitrofanov, V. Pogrebnoy, O. Dovzhenko // Proceeding of the 2nd fib Congress, Naples, Italy, June 5-8, 2006, paper ID3-61.

21. Митрофанов, В. П. Про можливість застосування передумови про ідеальну пластичність до бетону [Текст] / В. П. Митрофанов, О. О. Довженко, В. В. Погрібний // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса : ОДАБА, 2002. – Вип. 7. – С. 118-124.

22. Теоретичне дослідження міцності на зріз бетонних балок-стінок за допомогою варіаційного методу в теорії пластичності бетону / О. О. Довженко, В. В. Погрібний, К. І. Залужна, Т. Ю. Качан [Текст] // Вісник Кременчуцького національного університету імені Юрія Остроградського: зб. наук. праць. – Кременчук: КрНУ, 2011. – С. 120-123.

Довженко Оксана Олександрівна, канд. техн. наук, доцент, професор кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050) 982-58-54. E-mail: o.o.dovzhenko@gmail.com.

Погрібний Володимир Володимирович, канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050)982-58-53. E-mail: v.v.pogrebnoy1960@gmail.com.

Чумак Євген Іванович, студент Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. E-mail: jeka8814@ukr.net.

Довженко Оксана Александровна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций и сопротивления материалов Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел.: (050) 982-58-54. E-mail: o.o.dovzhenko@gmail.com.

Погребной Владимир Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций и сопротивления материалов Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел.: (050) 982-58-53. E-mail: v.v.pogrebnoy1960@gmail.com.

Чумак Евгений Иванович, студент Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. E-mail: jeka8814@ukr.net.

Dovzhenko Oksana Oleksandrivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of "Reinforced Concrete and Stone Structures and Resistance of Materials", Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Тел.: (050) 982-58-54. E-mail: o.o.dovzhenko@gmail.com.

Pohribnyi Volodymyr Volodymyrovych, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of "Reinforced Concrete and Stone Structures and Resistance of Materials", Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Тел.: (050) 982-58-53. E-mail: v.v.pogrebnoy1960@gmail.com.

Chumak Yevhen Ivanovych, student, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.

Статтю прийнято 7.06.2018 р.

УДК 666.972.12

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ ЛЕГКИХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ**

Асист. М. В. Острыжнюк, кандидаты техн. наук С. В. Савченко,
С. И. Гедулян, Н. Р. Антониук (ОГАСА)

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
ЛЕГКИХ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ, ЩО САМОУЩІЛЬНЮЮТЬСЯ,
З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ**

Асист. М. В. Острижнюк, кандидати техн. наук С. В. Савченко,
С. І. Гедулян, Н. Р. Антониук (ОДАБА)

**MODELING AND ANALYSIS OF RHEOLOGICAL INDICATORS
OF SELF-COMPACTING LIGHTWEIGHT CONCRETE
TO INCREASE THEIR PROCESSABILITY**

Assistant M. Ostryzniuk, cand. of techn. sciences S. Savchenko, S. Gedulyan, N. Antoniuk

В статье предложен способ повышения технологических показателей самоуплотняющихся бетонных смесей на основе легкого керамзитового заполнителя посредством управления реологическими параметрами их цементной матрицы, за счет применения функциональных групп модифицирующих добавок и мелкодисперсной минеральной добавки с использованием аналитических методов компьютерного материаловедения. Этот подход позволяет решить основную проблему при применении бетонов на легком заполнителе – вытеснение зерен керамзита жидкой растворной фазой – с обеспечением требуемой подвижности и сохранением высокой стабильности.

***Ключевые слова:** самоуплотняющиеся легкие бетонные смеси, реология, параметры модели реологического поведения.*

У статті запропоновано спосіб підвищення технологічних показників бетонної суміші, що самоущільнюється, на основі легкого керамзитового заповнювача за допомогою управління реологічними параметрами їх цементної матриці, за рахунок використання функціональних груп модифікувальних добавок та дрібнодисперсної мінеральної добавки з використанням аналітичних методів комп'ютерного матеріалознавства. Завданням дослідження було забезпечення в таких сумішах підвищеної пластичності і високої стабільності, що дасть змогу зберегти їх високу рухливість і вирішити проблему витиснення зерен легкого заповнювача. Запропоновано адекватну модель реологічної поведінки розчинів, що досліджувались. Встановлено вплив дрібнодисперсної мінеральної добавки, пластифікувальної добавки карбоксилатного типу та стабілізатора на реологічні параметри (коефіцієнт в'язкості k та граничне напруження зсуву τ_0) легкої бетонної суміші, що самоущільнюється. Показано, що введення пластифікувальної добавки та золи-винесення в кількості до 15% у значній мірі знижує індекс течії, що забезпечує зростання коефіцієнта в'язкості, підвищуючи пластичність суміші. Підвищення опірності рідкої фази розчину тиску, спливаючих при більш низькій щільності зерен заповнювача, досягається за рахунок введення золи-винесення, яка ущільнює

цементну матрицю, і добавки-стабілізатора до 0,035 %. Даний підхід, що базується на аналізі однофакторних залежностей впливу факторів, що варіюються, на коефіцієнти моделі реологічної поведінки, дає змогу вирішити основну проблему при застосуванні бетонів на легкому заповнювачі – витиснення керамзитових зерен рідкою розчинною фазою – з забезпеченням необхідної рухомості та збереженням високої стабільності. В результаті аналізу отриманих теоретичних та практичних даних зроблено припущення, що, балансує між показниками коефіцієнтів k і τ_0 , теоретично є можливим отримати бетонну суміш на легкому заповнювачі, що самоущільнюється, із забезпеченням її рухливості і однорідності.

Ключові слова: легкі бетонні суміші, що самоущільнюються, реологія, параметри моделі реологічної поведінки.

In this paper we propose way to improve the technological performance of self-compacting concrete based on lightweight expanded clay aggregate by control of rheological parameters of their cement matrix by purposeful modifying of additives' functional groups and microfine mineral filler using analytical methods of computer materials science. The aim of the study was to ensure in such mixtures an increased plasticity and high stability, which can allow them to retain their high mobility and solve the problem of displacing grains of lightweight aggregate. During the analyze the results of rheometry of the investigated solution mixtures the most appropriate model describing their rheological behavior has been determined. The effect on the rheological parameters of the self-compacting lightweight concrete mixes (viscosity coefficient and yield point) of a finely dispersed fly ash excipient, a carboxylate superplasticizer, and a stabilizer additive was established. It has been shown that the adding of a plasticizing additive and fly ash in an amount of up to 15% significantly reduces the flow index, which provides an increase in the viscosity coefficient, increasing the plasticity of the mixture, and an increase in the resistance of the liquid phase of the solution to the pressure of floating at a lower density aggregate grain is achieved by adding fly ash, sealing cement matrix, and stabilizer additives up to 0.035%. This approach of analyze of monofactorial dependencies of variable factors' influence on coefficients of rheological behavior models allows to solve the main problem when using concrete on lightweight aggregate – crowding out expanded clay grains by solution liquid phase – with providing the necessary fluidity (workability, passing and filling ability, flowability) and maintaining high stability (structure viscosity, segregation resistance). As a result of the analysis of the theoretical and practical data obtained, it was assumed that balancing between the coefficients k and τ_0 , it is theoretically possible to obtain a concrete mixture on a self-compacting lightweight aggregate, ensuring its mobility and homogeneity.

Keywords: self-compacting lightweight concrete mixes, rheology, parameters of rheological behavior models.

Введение. Самоуплотняющийся бетон на легком заполнителе является высокоэффективным материалом, который сочетает в себе преимущества конструкционного легкого бетона (LWC), такие как: снижение постоянных нагрузок, высокая тепло- и звукоизоляционная способность, повышенная долговечность, устойчивость к температурному и химическому воздействию [1] с характеристиками самоуплотняющихся

бетонных смесей (SCC), выраженных в улучшенной заполняемости опалубки и высокой проходимости, а также устойчивости к сегрегации [2]. Очевидный контраст между свойствами, такими как низкая «плотность» (низкая динамическая энергия смеси во время течения) и самоуплотняемость, которая зависит от динамических характеристик, делает производство самоуплотняющихся легких бетонов (SCLWC) весьма неблагоприятным

ятным. Тем не менее, опыт, полученный зарубежными учеными [3-5], показал, что правильно спроектированные и приготовленные смеси SCLWC отвечают всему комплексу требований при производстве работ с обеспечением высокого уровня качества, что является значительным шагом вперед в изучаемой технологии.

Анализ последних исследований и публикаций. Над проблемами технологии SCC работают такие зарубежные исследователи, как Okamura H., Andreas L., Bram D., Nai-Qian F., Hao-Wen Y., Sahmaran M., Yun Wang C. и др. Внедрению технологии SCC в украинскую практику способствуют работы Коваля С. В., Болотских О. Н., Полякова Д. М. и др. Из анализа данных работ следует вывод, что тип и характеристики легковесных заполнителей являются основными факторами, влияющими на качественные показатели как бетонной смеси, так на физико-механические свойства затвердевшего бетона, а характеристики таких заполнителей разнятся не только от типа материала, но и в границах того же типа, произведенного на разных заводах.

Среди основных проблем при разработке самоуплотняющегося керамзитобетона следует выделить его низкий объемный вес вследствие характеристик применяемого заполнителя.

Основным компонентом смесей SCLWC является керамзитовый заполнитель фракции до 10 мм, что влечет за собой проблему вытеснения его зерен жидкой фазой, снижая однородность их распределения по объему. Решением может являться тщательное регулирование зернового каркаса смеси (минимизация разности «плотностей» между цементной пастой, наполнителем и заполнителем) и обеспечение оптимальных реологических свойств на уровне растворной матрицы.

При сравнительном анализе классических SCC смесей и SCLWC, полученных с использованием методики,

разработанной в Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie (UWM) при участии проф. Коваля С. В. [6], на основе компонентов, подобранных при изучении работ по этому направлению, отмечается явное увеличение доли золы-уноса и песка (легкого или тяжелого, либо их комбинации). Также при необходимости получения высокопрочного бетона может наблюдаться повышение расхода цемента.

Определение цели и задания исследования. Целью данной работы являлось изучение влияния на реологические параметры растворной матрицы SCLWC активной минеральной добавки золы-уноса, стабилизатора и пластифицирующей добавки поликарбоксилатного типа. Задачей исследования было обеспечение в таких смесях повышенной пластичности и высокой стабильности, что может позволить сохранить их высокую подвижность и решить проблему вытеснения зерен легковесного заполнителя.

Основная часть исследования. Придание смеси качественных показателей по технологичности (подвижность, сегрегация) возможно посредством регулирования параметров моделей реологического поведения (рис. 1), а именно вязкостного коэффициента k , $\text{Па}\cdot\text{с}^{1/n}$, и предела текучести τ_0 , Па [7, 8]. Анализ результатов реометрии исследуемых растворных смесей показал, что наиболее целесообразным является использование модели Гершеля-Балкли.

Так, повышенная пластичность смеси (и, следовательно, подвижность) достигается повышением k за счет снижения индекса течения n при увеличении концентрации твердой фазы в растворе (уплотнение ее структуры мелкодисперсной минеральной добавкой), а высокая стабильность смеси (снижение риска вытеснения керамзита на поверхность) может быть достигнута ограниченным повышением предельного напряжения сдвига растворной фазы τ_0 .

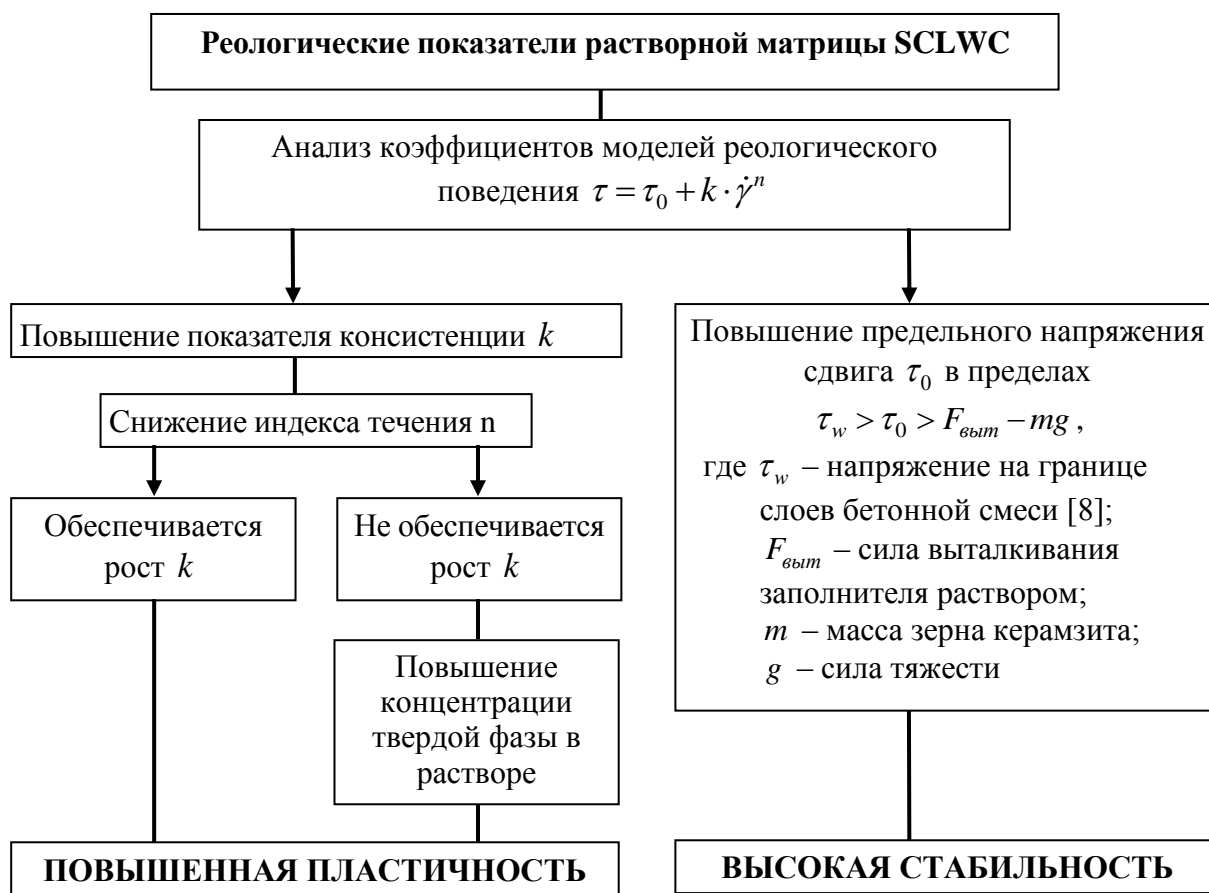


Рис. 1. Схема зависимости технологичности от реологических показателей растворной матрицы SCLWC

Балансируя между этими показателями коэффициента k и τ_0 , теоретически является возможным получить самоуплотняющуюся бетонную смесь на легком заполнителе с обеспечением его подвижности и однородности.

Как показывают многочисленные исследования [9, 10], для управления в значительной мере индексом течения в суспензиях на основе портландцементного вяжущего применяют различной природы полимерные редиспергируемые порошки (поливинилацетатные, винилацетатэтиленовые и др.), которые за счет образования в цементном растворе пленок вокруг частиц способны значительно изменять данный реологический показатель. Однако применение таких довольно дорогостоящих

полимерных добавок в составе самоуплотняющихся бетонных смесей нецелесообразно.

Для этого проведен эксперимент на уровне цементной матрицы по D-оптимальному трехфакторному плану (табл. 1) с 15 опытными точками. В составе цементных паст варьировались следующие рецептурные факторы: содержание золы-уноса Ольштынской ТЭС (дисперсность $2700 \text{ см}^2/\text{г}$) (FA) $X_1 = 15 \pm 15 \%$, состав активной минеральной добавки приведен в табл. 2; пластифицирующая добавка Sika ViscoCrete-20 Gold на основе поликарбоксилатных эфиров (плотность $1,06 \text{ г/см}^3$; содержание $\text{Cl} \leq 0,10 \%$; Na_2O эквивалент $\leq 1,50 \%$; $\text{pH} = 4$) (SP) $X_2 = 0,15 \pm 0,15 \%$; стабилизатор смеси CX ISOSTAB 6003 на

основе натурального полисахарида (плотность $1,01 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$; содержание $\text{Cl} \leq 0,10 \%$; Na_2O эквивалент $\leq 0,50 \%$) (ST)

$X_3 = 0,03 \pm 0,03 \%$. В качестве вяжущего использовался цемент СЕМ I 52,5 R (С).

Таблица 1

План эксперимента и уровни варьирования факторов

№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	FA, %	SP, %	ST, %	FA, г	SP, мл	ST, мл	C, г	W, мл
1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	3000	1140
2	-1	-1	1	0	0	0,06	0	0	1,8		
3	-1	0	0	0	0,15	0,03	0	4,5	0,9		
4	-1	1	-1	0	0,3	0	0	9	0		
5	-1	1	1	0	0,3	0,06	0	9	1,8		
6	0	-1	0	15	0	0,03	450	0	0,9	2550	
7	0	1	0	15	0,3	0,03	450	9	0,9		
8	0	0	-1	15	0,15	0	450	4,5	0		
9	0	0	1	15	0,15	0,06	450	4,5	1,8		
10	0	0	0	15	0,15	0,03	450	4,5	0,9	2100	
11	1	-1	-1	30	0	0	900	0	0		
12	1	-1	1	30	0	0,06	900	0	1,8		
13	1	0	0	30	0,15	0,03	900	4,5	0,9		
14	1	1	-1	30	0,3	0	900	9	0		
15	1	1	1	30	0,3	0,06	900	9	1,8		

Таблица 2

Состав активной минеральной добавки

% массы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	Na ₂ O
Зола-уноса (черный уголь)	59,2	24,3	8,1	0,5	2,6	2,3	1,0	0,1	0,63

Эксперимент проводился в Варминско-Мазурском университете (Ольштын, Польша) на современном оборудовании, в частности на абсолютном реометре Rheotest RN 4, позволяющем в обоих режимах измерения (CS/CR) производить построения кривых вязкости и течения в широких деформационных диапазонах и проводить их комплексный реологический анализ. Прибор имеет множество измерительных систем: конус – пластина, пластина – пластина, концентрические цилиндры, и оборудован модулем контроля температуры Пельтье.

По результатам анализа полученных экспериментальных данных в системе COMPEX были построены модели влияния используемых добавок на индекс течения n (рис. 2).

Видно, что введение пластифицирующей добавки Sika Gold (за счет снижения поверхностного натяжения и стерического эффекта добавки [2]), а также наличие золы-уноса (в результате создания прослоек и блокирования зерен цемента) в количестве до 15 % в значительной степени снижает индекс течения, что обеспечивает рост коэффициента вязкости, повышая пластичность смеси. Дальнейшее введение

твердой фазы требуется только в случае, если увеличение k не сопровождается соответствующим снижением n , тем самым приводя к увеличению вязкости системы и, как следствие, потере пластичности [11],

что приводит к необходимости введения в смесь значительного количества воды [12]. В нашем же случае введение золы-уноса выше указанной дозировки нецелесообразно.

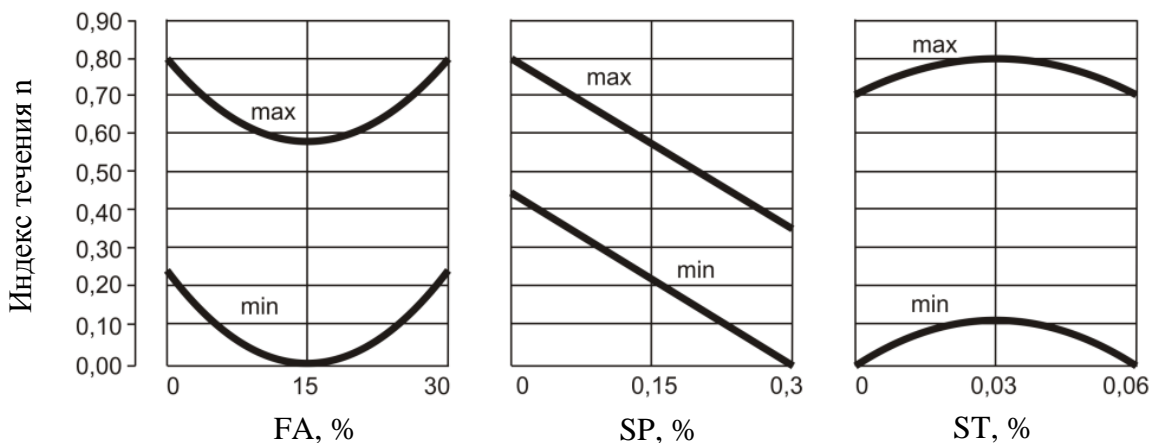


Рис. 2. Влияние факторов состава на индекс течения n в зонах максимума и минимума

Как показывают однофакторные зависимости (рис. 3), повышение сопротивляемости жидкой фазы раствора давлению всплывающих при более низкой плотности зерен заполнителя достигается за счет

введения золы-уноса, уплотняющей цементную матрицу, и добавки ISOSTAB до 0,035 %, обладающей высоким стабилизирующим эффектом.

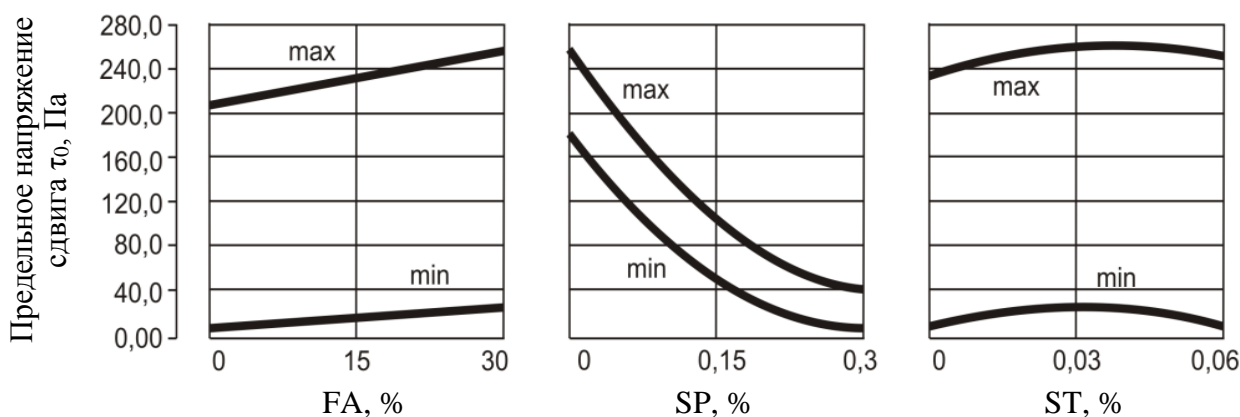


Рис. 3. Влияние факторов состава на предельное напряжение сдвига τ_0 в зонах максимума и минимума

Выводы. Таким образом, в работе показана возможность получения самоуплотняющихся легких бетонов на керамзитовом заполнителе с обеспечением повышенной подвижности и стабильности с позиции управления реологическими показателями цементной матрицы бетон-

ных смесей, за счет целенаправленного модифицирования пластифицирующей добавки Sika ViscoCrete-20 Gold, стабилизатора CX ISOSTAB 6003 и введения в состав активной минеральной добавки золы-уноса.

Список использованных источников

1. Попов, К. Н. Строительные материалы и изделия [Текст] : учебник / К. Н. Попов, М. Б. Каддо. – М. : Высшая школа, 2001. – 367 с.
2. Коваль, С. В. Моделирование и оптимизация состава и свойств модифицированных бетонов [Текст] / С. В. Коваль. – Одесса : Астропринт, 2012. – 264 с.
3. Maghsoudi, A. A. Mix design and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete [Text] / A. A. Maghsoudi, Sh. Mohamadpour, M. Maghsoudi // Int. Journal of Civil Eng. – 2011. – V. 9, № 3. – P. 230-236.
4. Hubertova, M. Development and experimental study on the properties of light-weight self-compacting concrete [Text] / M. Hubertova, R. Hela // In 5th RILEM Symposium on SCC. Ghent, Belgium, 2007. – P. 851-856.
5. Okamura, H. Self-Compacting Concrete [Text] / H. Okamura, M. Ouchi // Journal of Advanced Concrete Technology. – Tokyo: Japan Concrete Institute, 2003. – Vol. 1, № 1. – P. 5-15.
6. Острыжнюк, М. В. Самоуплотняющийся легкий бетон: состав и свойства [Текст] / М. В. Острыжнюк // Вісник ОДАБА. – Одеса : Зовнішрекламсервіс, 2015. – Вип. 57. – С. 335-340.
7. Поляков, Д. М. Самоуплотняющиеся бетоны с карбонатным наполнителем [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Поляков Дмитрий Михайлович. – Одесса : ОГАСА, 2010. – 201 с.
8. Гедулян, С. И. Эффективные полимерцементные растворы для ремонта железобетонных конструкций [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Гедулян Сергей Иванович. – Одесса : ОГАСА, 2016. – 199 с.
9. Влияние полимерной фибры на эффективную вязкость полимерминеральных композиций при разных скоростях сдвига [Текст] / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, С. А. Крюковская, Т. И. Пищева // Вісник ДНАБіА. – Макіївка : ДНАБіА, 2010. – Вип. №1(81). – С. 226-232.
10. Попов, О. А. Реологические параметры трехкомпонентных полимерных эмульсий на основе жидкой фазы, насыщенной гидроксидом кальция [Текст] / О. А. Попов, К. М. Москалева, А. В. Рожнюк // Вісник ОДАБА. – Одеса : Зовнішрекламсервіс, 2015. – Вип. 52. – С. 335-340.
11. Контроль реологических свойств буровых растворов по показателям k и n и эффективной вязкости при низких скоростях сдвига [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – FTK NNov Company, 2012 . – Режим доступа: <http://www.ftk-nnov.ru/problemu-promyvki-skvazhin-s-gorizontalnymi/kontrol-reologicheskix-svoystv-burovyx-rastvorov.html> (дата звернення 23.10.2015).

12. Zaichenko, M. The influence of extra mixing water on the properties of structural lightweight aggregate concrete [Text] / M. Zaichenko, S. Lakhtaryna, A. Korsun // Procedia Engineering, 2015. – Vol. 117. – Pp. 1036-1042.

Острижнюк Максим Володимирович, асистент кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (066) 202-78-81. E-mail: lightlyman@ukr.net.

Савченко Світлана Валентинівна, канд. техн. наук, доцент кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (095) 682-84-28.

E-mail: koval_sv@ukr.net.

Гедулян Сергій Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (063) 450-08-05. E-mail: rio@ogasa.org.ua.

Антонюк Надія Романівна, канд. техн. наук, доцент кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (067) 489-06-96.

E-mail: antonuk_nr@ukr.net.

Острижнюк Максим Владимирович, ассистент кафедры процессов и аппаратов в технологии строительных материалов Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел.: (066) 202-78-81.

E-mail: lightlyman@ukr.net.

Савченко Светлана Валентиновна, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и аппаратов в технологии строительных материалов Одесской государственной академии строительства и архитектуры.

Тел. : (095) 682-84-28. E-mail: koval_sv@ukr.net.

Гедулян Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и аппаратов в технологии строительных материалов Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел. : (063) 450-08-05.

E-mail: rio@ogasa.org.ua.

Антонюк Надежда Романовна, канд. техн. наук, доцент кафедры процессов и аппаратов в технологии строительных материалов Одесской государственной академии строительства и архитектуры.

Тел. : (067) 489-06-96. E-mail: antonuk_nr@ukr.net.

Ostryzniuk Maksym Volodymyrovych, assistant professor of the Department of Processes and Apparatus in the Building Materials Technologies of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Tel.: (066) 202-78-81. E-mail: lightlyman@ukr.net.

Savchenko Svitlana Valentynivna, Candidate of technical sciences, Associate professor of Processes and Apparatus in the Building Materials Technologies of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Tel.: (095) 682-84-28. E-mail: koval_sv@ukr.net.

Gedulyan Sergii Ivanovich, Candidate of technical sciences, Associate professor of Processes and Apparatus in the Building Materials Technologies of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Tel.: (063) 450-08-05. E-mail: rio@ogasa.org.ua.

Antoniuk Nadiia Romanivna, Candidate of technical sciences, Associate professor of Processes and Apparatus in the Building Materials Technologies of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Tel.: (067) 489-06-96. E-mail: antonuk_nr@ukr.net.

Статтю прийнято 7.06.2018 р.

УДК 691:628.2

**ВПЛИВ КИСЛОТНО-ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОКСИДНИХ
НАПОВНЮВАЧІВ НА ВІЛЬНУ ПОВЕРХНЕВУ ЕНЕРГІЮ ЕПОКСИПОЛІМЕРНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Кандидати техн. наук Ю. М. Данченко, Т. М. Обіженко, М. П. Качоманова,
асп. М. Г. Тесленко (ХНУБА)

**ВЛИЯНИЕ КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ОКСИДНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ
НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТНУЮ ЭНЕРГИЮ ЭПОКСИПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Кандидаты техн. наук Ю. М. Данченко, Т. М. Обиженко, М. П. Качоманова,
асп. М. Г. Тесленко (ХНУСА)

**INFLUENCE OF ACID-BASE PROPERTIES OF OXIDE FILLERS ON THE FREE
SURFACE ENERGY OF EPOXY-POLYMER MATERIALS**

Yu. M. Danchenko, PhD (Tech.), T. M. Obigenko, PhD (Tech.), M. P. Kachomanova,
PhD (Tech.), M. H. Teslenko

Методом Ван Осса – Чодері – Гуда (ВОЧГ) визначено складові вільної поверхневої енергії (ВПЕ) епоксидних полімерних композиційних матеріалів, сталі і скла. Встановлено, що розраховані з використанням комп'ютерної програми значення ВПЕ задовільно корелюють з даними інших авторів. Показано, що при зростанні загальної кількості активних центрів оксидних наповнювачів значення складових ВПЕ (повної γ_s , дисперсійної γ^d та кислотно-основної γ^{ab}) композитів зростає прямо пропорційно. Встановлено, що неоднозначний вплив поверхневих властивостей оксидних наповнювачів на кислотну γ^a та основну γ^b компоненти ВПЕ пов'язаний з міжфазними кислотно-основними взаємодіями.

Ключові слова: епоксидний матеріал, оксидний наповнювач, вільна поверхнева енергія, метод ВОЧГ, кислотно-основні властивості.

Методом Ван Осса – Чодэри – Гуда (ВОЧГ) определены составляющие свободной поверхностной энергии (СПЭ) эпоксидных полимерных композиционных материалов, стали и стекла. Установлено, что рассчитанные с использованием компьютерной программы значения СПЭ удовлетворительно коррелируют с данными других авторов. Показано, что при росте общего количества активных центров оксидных наполнителей значение составляющих СПЭ (полной γ_s , дисперсионной γ^d и кислотно-основной γ^{ab}) композитов растет прямо пропорционально. Установлено, что неоднозначное влияние поверхностных свойств оксидных наполнителей на кислотную γ^a и основную γ^b компоненты СПЭ композитов связано с межфазными кислотно-основными взаимодействиями.

Ключевые слова: эпоксидный материал, оксидный наполнитель, свободная поверхностная энергия, метод ВОЧГ, кислотно-основные свойства.

The Van Oss-Chaudari-Hood (VOCH) method were used to determine the free surface energy (FSE) components of epoxy polymer composite materials, steel and glass. The research was carried out on the basis of experimental determination of boundary angle of wetting of solid surfaces with test liquids. Test liquids were used: distilled water, formamide and α -bromonaphthalene. It is

established that the FSE values calculated using the computer program of calculations "Least Square Wetting Analyzer" correlate satisfactorily with the data of other authors. As materials for research, selected filled polymeric compositions based on epoxy resin of the brand ED-20 and aliphatic amine curing agent of diethylenetriamine DETA brand. The compositions solidified in the air (293-298 K) for at least 72 hours, at a temperature of 373 K - 4 hours. Oxide fillers were air-dry disperse materials based on oxides of different chemical nature of Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO . For fillers, studies were performed using scanning electron microscopy and X-ray diffraction analysis. To determine the spectrum pK_a and the number of active centers on the surface of the fillers, the method of adsorption Gamet color indicators from aqueous solutions was used. It is established that the nature of the surface of the fillers is directly proportional to the acid-base properties of oxides. It is shown that with the growth of the total number of active centers of oxide fillers, the value of the constituents of the FSE (total γ_s , dispersion γ^d and acid-base γ^{ab}) of composites grows in direct proportion. The presence of acid-base active centers on the surface of oxide fillers affects the values of all constituents of FSE filled composites. It was found that the ambiguous effect of the surface properties of oxide fillers on acidic γ^a and basic γ^b components of the FSE of composites is related to interphase acid-base interactions. The determined regularities will allow predicting the change of surface energy characteristics of epoxy polymer composite materials and their properties when modified with oxide fillers of different chemical nature.

Key words: epoxy material, oxide filler, free surface energy, VOCH method, acid-base properties.

Вступ. Вільна поверхнева енергія (ВПЕ) характеризує енергетичний стан твердої поверхні і може бути критерієм оцінки захисних властивостей та експлуатаційних характеристик полімерних композиційних матеріалів. У деяких випадках ВПЕ є незамінною характеристикою властивостей полімерних покриттів і плівок, адгезійних контактів і адсорбції полімерів. У результаті порівняння ВПЕ полімерних матеріалів, що отримані різними методами, можна припустити можливість використання ВПЕ у практичних цілях з достатнім ступенем надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кореляція величин ВПЕ із властивостями полімерних матеріалів зумовлена безпосереднім зв'язком з міжмолекулярними взаємодіями і енергією когезії [1, 2]. В роботах [3-6] проведено експериментальне визначення енергетичних поверхневих характеристик широкого спектра різних полімерних композиційних матеріалів. Установлено, що дослідження ВПЕ дає змогу прогнозувати і спрямовано регулювати адгезійні взаємодії між поверхнями різних матеріалів. У роботі [3]

показано, що критерієм вибору модифікувальних поверхнево-активних добавок для регулювання адгезійної міцності в системі «епоксиполімер – сталь» може бути кислотно-основна (полярна) складова ВПЕ епоксиполімерів.

На відміну від ненаповнених полімерів, ВПЕ матеріалів з наповнювачами досліджено недостатньо. Відомо, що при наповненні, на міжфазній поверхні між функціональними групами молекул полімерів та поверхнею наповнювачів утворюються низькоенергетичні міжмолекулярні зв'язки, які можуть впливати на енергетичний стан поверхні композиту [5-8]. Вплив природи поверхні, розміру частинок і вмісту наповнювача на величину ВПЕ композиційних матеріалів зазначались у роботах [4, 9, 10]. Теоретичне та експериментальне обґрунтування зв'язку ВПЕ з міжфазними взаємодіями в наповнених полімерних матеріалах розглянуто у [8]. У роботі [9] здійснено математичне моделювання впливу вмісту та енергетичних поверхневих характеристик наповнювачів на ВПЕ епоксидних матеріалів. Модель побудовано

на уявленні про адгезійну кислотно-основну міжфазну взаємодію між епоксидною полімерною матрицею та поверхнею наповнювача. Показано можливість прогнозування складових ВПЕ епоксидних наповнених матеріалів. Запропонована модель підтверджується експериментальними дослідженнями [11]. Однак подані в літературі результати не дають змоги зробити узагальнюючі висновки про закономірності впливу кислотно-основних поверхневих властивостей наповнювачів на величину ВПЕ полімерних композитів. Тому подальші дослідження, прогнозування і регулювання ВПЕ епоксидних полімерних композитів, які містять наповнювачі з певними кислотно-основними властивостями, є важливими науково-практичними завданнями. Встановлення цих закономірностей надасть можливість отримувати композиційні матеріали з заданими властивостями та характеристиками.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження ВПЕ епоксидних полімерних композиційних матеріалів із дисперсними оксидними неорганічними наповнювачами.

Для досягнення мети роботи сформульовано такі задачі:

- дослідження фізико-хімічних та поверхневих кислотно-основних властивостей оксидних наповнювачів;
- визначення складових ВПЕ для епоксидних матеріалів, сталі і скла методом Ван Осса – Чодері – Гуда (ВОЧГ);

- установлення взаємозв'язків між компонентами ВПЕ наповнених епоксидних полімерних композиційних матеріалів та кислотно-основними поверхневими властивостями оксидних наповнювачів.

Основна частина дослідження. Матеріалами для дослідження обрано наповнені полімерні композиції на основі епоксидіанової смоли марки ЕД-20 (ДСТУ 2093-92) і стехіометричної кількості аліфатичного амінного твердника діетилен-триаміну марки ДЕТА (ТУ 6-02-91486). Композиції тверділи на повітрі (293–298 К) не менше 72 год, при температурі 373 К – 4 год. Наповнені композиції готувались у певній технологічній послідовності. Смола ЕД-20 змішувалась з твердником ДЕТА до однорідної суміші, при цьому в'язкість смоли зменшувалась. Потім в епоксидноаміну систему додавався наповнювач у кількості 10 об. % і перемішувався до однорідної суміші. Оксидними наповнювачами були повітряно-сухі дисперсні матеріали на основі оксидів різної хімічної природи Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO . Питома поверхня наповнювачів визначалась методом БЕТ (Брунауера, Еммета, Теллера). Для обраних наповнювачів проводились дослідження морфології поверхні та розміру частинок за допомогою електронно-мікроскопічних знімків, що виконані сканувальним електронним мікроскопом марки JSM-6390LV. Рентгенофазовий аналіз здійснювався на рентгенофазовому дифрактометрі ДРОН-2. Досліджені властивості оксидних наповнювачів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Властивості дисперсних оксидних наповнювачів

Наповнювач	Питома поверхня, $S_{\text{пит}}$, м ² /г	Середній розмір частинок, мкм	Мінеральний склад
Рутил, ГОСТ 22938-78 (РТ)	1,30	10	Рутил (TiO_2) Анараз (TiO_2)
Кальцит, ГОСТ 4530-76 (КЦ)	7,95	30	Кальцит (CaCO_3)
Червоний шлам*, ТУ У 8785-028-200 (ШН)	11,35	3	Гематит ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) Гетит (FeOOH)

* Як супутні мінерали виявлено лимоніт, чотирикальцієвий алюмоферит і еtringіт.

Для визначення спектра pK_a та кількості активних центрів на поверхні наповнювачів користувались методом адсорбції кольорових індикаторів Гамета з водних розчинів [12]. При цьому визначалась кількість кислотних q_{acid}

($pK_a < 7$), основних q_{base} ($pK_a > 7$) та загальна сума активних центрів q_{sum} . За результатами розраховувався кислотно-основний показник $Q = q_{acid} / q_{base}$. Досліджені властивості наповнювачів подано на рис. 1 і в табл. 2.

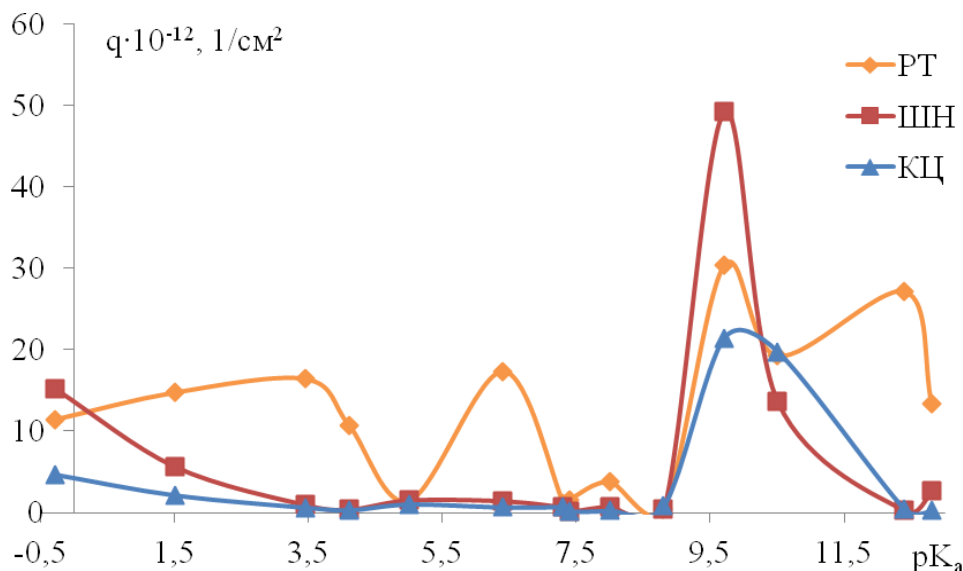


Рис. 1. pK_a -спектр кислотно-основних активних центрів на поверхні рутилу (РТ), червоного шламу (ШН) та кальциту (КЦ)

Таблиця 2

Кислотно-основні властивості оксидних наповнювачів

Наповнювач	$q_{acid} \cdot 10^{-12}, 1/см^2$	$q_{base} \cdot 10^{-12}, 1/см^2$	$q_{sum} \cdot 10^{-12}, 1/см^2$	Q
РТ	73,2	95,8	169,0	0,76
КЦ	10,1	43,0	53,1	0,23
ШН	25,9	67,1	92,9	0,39

Як бачимо з поданих результатів дослідження оксидних наповнювачів РТ (TiO_2), ШН (Fe_2O_3) і КЦ (CaO), кислотність поверхні та загальна питома кількість активних поверхневих центрів зростають у ряду: КЦ ($Q \approx 0,23$) < ШН ($Q \approx 0,39$) < РТ ($Q \approx 0,76$). Таким чином, очевидно, що характер поверхні наповнювача прямо пропорційно залежить від кислотно-основних властивостей оксиду. Отримані дані підтверджуються результатами

квантово-хімічного моделювання кислотно-основних властивостей активних центрів на поверхні оксидів [13]. У результаті моделювання встановлено, що кислотність центрів Бренстеда на поверхні оксидів зростає в ряду: $CaO < Fe_2O_3 < TiO_2$.

Дослідження складових ВПЕ зразків епоксиполімерних композитів, сталі і скла здійснювалось методом ВОЧГ на основі експериментального визначення крайових кутів змочування твердих поверхонь

тестовими рідинами. Як тестові рідини використовувались: дистильована вода (ДВ), формамід (ФА) і α -бромнафталін (БН), енергетичні характеристики яких відомі [4,11]. Вимірювались крайові кути змочування поверхонь: сталі, скла, епоксидного композиту ЕД-20+ДЕТА (ЕП)

та композитів, що наповнені рутилом (ЕП+РТ), кальцитом (ЕП+КЦ) і червоним шламом (ЕП+ШН). Для оцінки достовірності результатів обчислювався довірчий інтервал. Результати вимірювань та розрахунків подано в табл. 3.

Таблиця 3

Величини крайових кутів змочування поверхонь тестовими рідинами

Поверхня	Крайовий кут змочування поверхонь θ тестовими рідинами, град		
	ДВ	ФА	БН
ЕП	78,4±1,6	63,1±2,3	41,1±2,6
ЕП+РТ	70,6±3,0	50,9±1,2	37,5±2,2
ЕП+КЦ	74,0±1,6	57,4±1,5	40,5±3,6
ЕП+ШН	77,5±3,0	69,5±3,0	39,9±2,4
Сталь	83,9±1,8	77,8±1,4	36,4±1,7
Скло	39,9±2,1	24,4±1,3	39,9±0,8

З поданих результатів випливає, що довірчий інтервал вимірювань крайових кутів змочування з вірогідністю 0,95 не перевищує $\pm 3,0$ град.

За отриманими значеннями крайових кутів змочування були розраховані компоненти ВПЕ для досліджуваних поверхонь. Розраховувались значення: γ_s – повної ВПЕ; γ^d – дисперсійної складової; γ^{ab} – кислотно-основної (полярної) складової, яка

поділяється на γ^a – кислотну та γ^b – основну компоненти. Розрахунок проводився з використанням автоматизованої системи вимірювань, що включає комп'ютерну програму обчислень «Least Square Wetting Analyzer» [11]. Результати розрахунків порівнювались з результатами, які були отримані іншими вітчизняними та зарубіжними авторами. Результати розрахунків подано в табл. 4.

Таблиця 4

Компоненти ВПЕ для ненаповнених епоксидних композитів, сталі і скла, мДж/м²

Поверхня	γ^d	γ^{ab}	γ^a	γ^b	γ_s
ЕП	34,3	0,8	0,02	9,7	35,0
ЕД-20+ДЕТА [4]	32,4	6,0	7,5	1,2	39,1
ЕД-20+ДЕТА [5]	36,1	6,8	-	-	42,9
ЕП+РТ	35,9	4,9	0,4	10,5	41,3
ЕП+КЦ	34,6	3,1	0,2	10,9	37,6
ЕП+ШН	34,8	4,4	0,3	15,0	39,2
Сталь	35,9	13,0	2,7	16,6	49,3
Сталь [14]	35–49	19–26	-	-	61–69
Сталь [4]	32,5	0	8,8	0	32,5
Сталь [5]	22–26	8–19	-	-	34–39
Скло	34,8	18,0	2,5	32,5	52,8
Скло [15]	32,7	17,6	1,7	45,3	50,1

Під час порівняння величин компонентів ВПЕ ненаповнених епоксидних композитів ЕД-20+ДЕТА виявлено задовільну кореляцію з відомими даними величин повної ВПЕ та дисперсійної складової (табл. 4). Суттєва різниця в значеннях полярної i , відповідно, кислотної та основної складових може пояснюватись різницею у режимах твердіння композицій. Так, у [4,5] твердіння композитів здійснювалось на повітрі за звичайних умов (293–298К). Для досліджуваних композицій, окрім твердіння на повітрі, проводилась термообробка при $T=373K$ протягом 4 год. При цьому в процес твердіння, очевидно, залучається додаткова кількість полярних функціональних груп олігомерів та твердників, і кислотно-основна складова ВПЕ може зменшуватись. Цей висновок підтверджується дослідженнями роботи [16], де показано, що збільшення температури твердіння епоксидних композицій призводить до зменшення ВПЕ та її складових.

Необхідно зазначити задовільну кореляцію отриманих значень ВПЕ з відомими даними для скла. Незначні відхилення пояснюються використанням різних наборів тестових рідин. Так, у роботі [15] використовувались: дистильована вода, формамід і дийодометан.

Найбільш суперечливі результати отримані для ВПЕ сталі (табл. 4). Під час порівняння відомих та отриманих результатів встановлено, що величини ВПЕ сталі змінюються в широких межах. Це пов'язано з тим, що ВПЕ сталевих зразків суттєво залежить від хімічного складу сплаву та наявності на поверхні продуктів окислення (оксидних плівок) [4]. Водночас відомо, що ступінь шорсткості сталевих пластин практично не впливає на значення складових ВПЕ [14]. Проте отримані значення компонентів ВПЕ сталевих зразків перебувають у межах, окреслених іншими авторами. Таким чином, можна зробити висновок, що проведена

порівняльна характеристика з даними вітчизняних та зарубіжних авторів підтверджує адекватність отриманих результатів.

При аналізі впливу кислотно-основних поверхневих властивостей наповнювачів на величини складових ВПЕ необхідно зазначити такі закономірності. В разі додавання будь-якого досліджуваного оксидного наповнювача значення всіх складових ВПЕ зростають. Цей факт є очевидним, враховуючи високоенергетичні поверхні оксидних матеріалів з великою кількістю активних центрів з різною функцією кислотності. При цьому дисперсійна складова γ^d збільшується на 1-5 %, кислотно-основна (полярна) складова γ^{ab} – у 3-6 разів і повна ВПЕ γ_s зростає на 7-18 %. З даних табл. 4 виходить, що зростання γ^d , γ^{ab} і γ_s прямо пропорційно залежить від загальної кількості поверхневих активних центрів наповнювачів q_{sum} . Під час наповнення найбільшому впливу підлягає кислотно-основна (полярна) складова ВПЕ γ^{ab} полімерних композитів. Цей факт є очевидним, враховуючи те, що поверхні оксидних неорганічних матеріалів характеризуються високою енергією і полярністю [17]. З даних табл. 4 випливає, що при збільшенні загальної кислотності поверхні оксидних наповнювачів (наближення показника Q до 1) зростають значення повної γ_s , полярної γ^{ab} та дисперсійної складових ВПЕ наповнених композитів.

Очевидно, що зміну кислотної γ^a та основної γ^b компонентів, що входять до складу полярної γ^{ab} складової ВПЕ полімерних композитів, необхідно пов'язувати з кількістю кислотних q_{acid} та основних q_{base} поверхневих активних центрів наповнювачів. Дані табл. 4 вказують на те, що γ^a наповнених композитів зростає при збільшенні q_{acid} . У випадку основної складової γ^b подібної кореляції не спостерігається. Тому при аналізі недостатньо розглядати загальний

кислотно-основний показник Q , а необхідно враховувати pK_a -спектр поверхневих активних центрів наповнювачів. З отриманих даних випливає, що основна складова композиту γ^b найбільше зростає (у 1,5 разу) при додаванні ШН. Очевидно, це пов'язано з тим, що на поверхні ШН (Fe_2O_3) три чверті (близько 75 %) поверхневого pK_a -спектра належить сильноосновним активним центрам з переважним значенням $pK_a \approx 9,5-10$. Водночас, додавання рутилу РТ (TiO_2) і кальциту КЦ (CaO), незважаючи на суттєву різницю (більше ніж у 2 рази) у кількості основних поверхневих активних центрів, практично однаково впливає на основну складову γ^b наповнених композитів. Відсутність кореляції між основною складовою γ^b ВПЕ композитів та кількістю основних активних центрів наповнювача можна пояснити тим, що в процесі утворення наповненого композиту на міжфазній поверхні відбуваються інтенсивні кислотно-основні взаємодії [8,11]. При цьому сильно основні активні центри поверхні наповнювачів, очевидно, утворюють фізико-хімічні зв'язки з кислотними гідроксильними групами епоксидного полімеру, які утворюються в процесі твердіння епоксидних смол з амінами. Кислотний характер ОН-груп епоксиамінного полімеру встановлений у [18].

Висновки. Таким чином, у результаті досліджень за допомогою методу ВОЧГ отримані величини складових вільної поверхневої енергії (ВПЕ) епоксидних полімерних композиційних матеріалів, а також сталеві і скляні поверхонь. Установлено, що розраховані з використанням комп'ютерної програми обчислень «Least Square Wetting Analyzer» значення ВПЕ задовільно корелюють з даними інших авторів. Показано, що наявність кислотно-основних активних центрів на поверхні оксидних наповнювачів впливає на всі складові ВПЕ наповнених композитів. При зростанні загальної кількості активних центрів наповнювачів значення складових ВПЕ (повної γ_s , дисперсійної γ^d та кислотно-основної γ^{ab}) композитів зростає прямо пропорційно. Встановлено, що неоднозначний вплив поверхневих властивостей оксидних наповнювачів на кислотну γ^a та основну γ^b компоненти ВПЕ композитів пов'язаний з міжфазними кислотно-основними взаємодіями в епоксидних композиційних матеріалах. Визначені закономірності нададуть можливість прогнозувати зміну поверхневих енергетичних характеристик (ВПЕ) епоксидних полімерних композиційних матеріалів та їх властивостей при модифікації оксидними наповнювачами різної хімічної природи.

Список використаних джерел

1. Stamm, M. Polymer surfaces and interfaces: characterization, modification and applications [Text] / M. Stamm. – Dresden: Springer, 2008. – P. 324.
2. Bracco, G. Surface science techniques [Text] / G. Bracco, B. Holst // Springer Series in Surface Sciences. – 2013. – № 51. – P. 3–9.
3. Барабаш, Е. С. Влияние модифицирующих добавок на адгезионную способность эпоксиаминных связующих к алюмоборсиликатному стеклу и стали [Текст] / Е. С. Барабаш, Ю. В. Попов, Ю. М. Данченко // Науковий вісник будівництва. – 2015. – №4(82). – С.122–128.
4. Старостина, И. А. Кислотно-основные взаимодействия и адгезия в металл-полимерных системах [Текст] / И. А. Старостина, О. В. Стоянов. – Казань : Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2010. – 200 с.

5. Строганов, В. Ф. Эпоксиполимерные адгезионные праймеры в антикоррозионной изоляции трубопроводов [Текст] / В. Ф. Строганов, И. В. Строганов, А. С. Ахметшин [и др.] // Изв. КГАСУ. – 2010. – № 1. – С. 342–346.
6. Данченко, Ю. М. Вплив кислотно-основних властивостей поверхні полімінеральних наповнювачів на структуру та характеристики епоксикомпозитів [Текст] / Ю. М. Данченко, Ю. В. Попов, О. С. Барабаш // Вопросы химии и химической технологии. – 2016. – Т. 3(107). – С. 53 – 60.
7. Ященко, Л. Н. Свойства полисилоксансодержащих эпоксиуретановых нанокомпозитов ангидридного отверждения [Текст] / Л. Н. Ященко // Укр. хим. журнал. – 2017. – Т. 83, № 4. – С. 73–80.
8. Li, Fei-Zhou Surface interaction energy of ceramic materials with epoxy resin [Text] / Fei-Zhou, Li, Zheng-Lin, Lu, Zhi-Huai, Yang, Kai, Qi // Polimery. – 2015. – V.60, № 7–8. – P. 468–471.
9. Danchenko, Yu. M. Regulation of free surface energy of epoxy polymer materials using mineral fillers [Text] / Yu. M. Danchenko // Polymer materials and technologies. – 2017. – V. 3. – № 2. – P. 56–63.
10. Zapata-Massot, C. Effect of the mineral filler on the surface properties of co-ground polymeric composites [Text] / C. Zapata-Massot, N. Le Boley // Part. Part. Charact. – 2007. – № 24. – P. 339–344.
11. Danchenko, Yu. Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system [Text] / Yu. Danchenko, V. Andronov, M. Teslenko, V. Permiakov, E. Rybka, R. Meleshchenko, A. Kosse // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol.1, Is.12(91). – P. 9–17.
12. Данченко, Ю. М. Комплексна оцінка кислотно-основних властивостей поверхні дисперсних оксидних наповнювачів [Текст] / Ю. М. Данченко, М. П. Качоманова // Науковий вісник будівництва. – 2016. – Т. 86, № 4. – С. 164–172.
13. Danchenko, Yu. Investigation into acid-basic equilibrium on the surface of oxides with various chemical nature [Text] / Yu. Danchenko, V. Andronov, E. Rybka, S. Skliarov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, Issue 12(88). – P. 17 – 25.
14. Зинина, И. Н. Влияние поверхностной энергии металлических образцов на прочность клеевых соединений [Текст] / И. Н. Зинина, М. В. Пиманов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2011. – № 2(12). – С. 127–130.
15. Hejda, F. Surface free energy determination by contact angle measurements – a comparison of various approaches [Text] / F. Hejda, P. Solar, J. Kousal // WDS'10 Proceeding of Contributed Papers. Part III. – 2010. – P. 25–30.
16. Черкасова, Н. Г. Исследование влияния состава и режима отверждения на поверхностную энергию эпоксиполимера [Текст] / Н. Г. Черкасова, Р. Л. Мокиенко, О. И. Михайлова // Вопросы химии и химической технологии. – 2002. – № 3. – С. 241–244.
17. Тарасевич, Ю. И. Поверхностные явления на дисперсных материалах [Текст] / Ю. И. Тарасевич. – К. : Наук. думка, 2011. – 390 с.
18. Данченко, Ю. М. Структурирование эпоксидной смолы в присутствии неионогенного поверхностно-активного вещества [Текст] / Ю. М. Данченко // Строительные материалы и изделия. – 2017. – № 5-6(96). – С. 70-72.

Данченко Юлія Михайлівна, канд. техн. наук, доцент кафедри загальної хімії, докторант кафедри фізико-хімічної механіки та технології будівельних матеріалів та виробів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (066) 322 47 45. E-mail: u_danchenko@ukr.net.
Обіженко Тетяна Миколаївна, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри загальної хімії Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (050) 201 14 62. E-mail: obigenko@ukr.net.
Качоманова Марія Павлівна, канд. техн. наук, асистент кафедри загальної хімії Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (063) 846 86 84. E-mail: amelia.masya@gmail.com.

Тесленко Михайло Геннадійович, аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (093) 523 25 74. E-mail: mihail_teslenko@ukr.net.

Данченко Юлія Михайлівна, канд. техн. наук, доцент кафедри общей хімії, докторант кафедри фізико-хімічної механіки та технології будівельних матеріалів та виробів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (066) 322 47 45. E-mail: u_danchenko@ukr.net.

Обиженко Татяна Николаевна, канд. техн. наук, доцент, завідувачка кафедри общей хімії Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (050) 201 14 62. E-mail: obigenko@ukr.net.

Качоманова Марія Павлівна, канд. техн. наук, асистент кафедри общей хімії Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (063) 846 86 84. E-mail: amelia.masya@gmail.com.

Тесленко Михайл Геннадієвич, аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (093) 523 25 74. E-mail: mihail_teslenko@ukr.net.

Danchenko Yuliya, PhD. Associate Professor of the Department of General Chemistry, Doctoral student of the Department of Physic-Chemical Mechanics and Technology of Building Materials and Products. Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (066) 322 47 45. E-mail: u_danchenko@ukr.net.

Obigenko Tatiana, PhD. Associate Professor, Head of the Department of General Chemistry. Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (050) 201 14 62. E-mail: obigenko@ukr.net.

Kachomanova Maria, PhD. Assistant of the Department of General Chemistry. Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (063) 846 86 84. E-mail: amelia.masya@gmail.com.

Teslenko Mykhailo, graduate student of the Department of automation of manufacturing processes. Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (093) 523 25 74. E-mail: mihail_teslenko@ukr.net.

Статтю прийнято 7.06.2018 р.

УДК 624.046:624.016

МІЦНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ СТАЛЕБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ СКЛАДЕНОГО ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ НА ЛЕГКИХ БЕТОНАХ

Д-р техн. наук О. В. Семко, канд. техн. наук Н. М. Магас, асп. В. О. Сіробаба (ПолтНТУ)

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ СТАЛЕБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СОСТАВНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ НА ЛЕГКИХ БЕТОНАХ

Д-р техн. наук А. В. Семко, канд. техн. наук Н. М. Магас, асп. В. А. Сіробаба (ПолтНТУ)

DENSITY AND DEFORMATIVITY OF STEEL CONCRETE STRUCTURES OF A DIRECT CIRCULATION PERIOD ON LIGHT CONCRETES

Dr. sc. sciences O. V. Semco, phd. tehn. N. M. Magas, pg. V. O. Sirobaba

Проведено аналіз та експериментальне обґрунтування створення коректної геометричної моделі сталебетонної конструкції. Проаналізовано та виконано підбір ефективних матеріалів для утворення ефективного перерізу легкої сталебетонної конструкції. Визначено фізико-механічні характеристики використаних матеріалів. Наведено результати експериментальних досліджень міцності та деформативності сталебетонних конструкцій складеного прямокутного перерізу на легкому полістиролбетоні. Проведено аналіз ефективності застосування даного типу конструкцій з подальшими рекомендаціями щодо використання у будівництві.

Ключові слова: сталобетон, експериментальні дослідження, полістиролбетон, міцність, деформативність.

Проведен анализ и экспериментальное обоснование создания корректной геометрической модели сталобетонной конструкции. Проанализирован и выполнен подбор эффективных материалов для образования эффективного сечения легкой сталобетонной конструкции. Определены физико-механические характеристики использованных материалов. Приведены результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности сталобетонных конструкций составного прямоугольного сечения на легком полистиролбетоне. Проведен анализ эффективности использования данного типа конструкций с последующими рекомендациями по использованию в строительстве.

Ключевые слова: сталобетон, экспериментальные исследования, полистиролбетон, прочность, деформативность.

A critical analysis of recent studies on the usage and design of lightweight steel structures has been carried out. The unresolved issue remains the definition of compatible work of light concrete and the profiles in composite closed structures working on compression. The corresponding data is not enough to provide clear recommendations for the design, modeling and actual operation of such structures. Therefore, the obtaining of new data, which allow to describe and correct as much as possible precisely the well-known mathematical models of the work of structures, to specify more accurate the boundary conditions is a current issue nowadays.

The data presented in this article have an experimental substantiation, which will further influence the creation of the correct geometric model of steel structure on light concrete. The selection of effective materials for the construction of a lightweight steel structure has been analyzed and performed. The physical and mechanical characteristics of the used materials are determined. The results of the experimental studies of strength and deformability of steel concrete structures of composite rectangular cross section on light polystyrene concrete are given. The experimental researches were carried out in three stages: the consideration of constructions of open section profiles, closed composite section and the formation of spatial steel structure - pylon. The efficiency of gradual reinforcement of composite profiles by polystyrene concrete has been determined. Characteristics of the destruction of each of the above listed composite steel and steel concrete structures are described. Photofixation of the destruction of steel concrete structures was carried out.

The effectiveness of using this type of structures is confirmed by the results of the experimental studies. Taking into account the absence of domestic and foreign normative base as for the design of lightweight steel structures, the collection of information, the conduct of field experiments, the standardization and synthesis of already existing works are the perspectives for the development and improvement of this type structures.

Key words: steel concrete, experimental research, polystyrene concrete, strength, deformability.

Вступ. Зведення каркасних будівель із застосуванням систем легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) є досить перспективним напрямком сьогодення. Але такі конструкції мають низку суттєвих недоліків та переваг. Серед недоліків слід зазначити теплопровідність легких

сталевих тонкостінних профілів, міцність, стійкість та ін. Одним із методів мінімізації цих недоліків є застосування комбінованих конструкцій, а саме утворення сталобетонних конструкцій із легких сталевих тонкостінних профілів та легкого бетону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У практиці конструкції даного виду застосовуються досить часто (утеплення легкими бетонами каркасних будівель із легких сталевих тонкостінних профілів). Даній тематиці присвячено наукові роботи таких вчених, як М. В. Савицький, В. І. Большаков, А. М. Сопільняк [1, с. 50; 2, с. 363] та ін. Проте в цих роботах розглядалися лише теплотехнічні властивості конструкцій з легких сталевих тонкостінних профілів.

Невирішені питання міцності, стійкості, деформативності, несучої здатності та конструктивних особливостей несучих легких сталевих тонкостінних профілів досліджували вчені І. В. Астахов, А. С. Білик, С. І. Білик, В. В. Зверев, Л. В. Енджиевський, А. І. Оглобля, С. Ф. Пічугін, О. В. Семко, В. О. Семко, Ю. О. Авраменко, Д. А. Прохоренко, В. В. Юрченко М. В. Лещенко [3-7] та ін.

Усі ці дослідження проводилися як для окремих елементів з легких сталевих тонкостінних профілів, так і з підсиленням легким бетоном. Але вирішення питання сумісної роботи легкого бетону і профілів у цілісних конструкціях, що працюють на стиск, є недостатнім для надання чітких рекомендацій щодо проектування таких конструкцій та врахування сумісної роботи матеріалів сталобетонної конструкції. Тому отримання реальних даних, які дають можливість якомога точніше описати та скоригувати загальновідомі математичні моделі роботи конструкцій, коректніше задавати граничні умови при моделюванні у програмних комплексах, є актуальною задачею.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження сталобетонних конструкцій із складеного прямокутного профілю, підсиленого полістиролбетоном, визначення граничної міцності, схеми деформування та граничних умов роботи новоутвореної конструкції експериментальним методом.

Основна частина дослідження.

Питання забезпечення просторової жорсткості при проектуванні малоповерхових будівель каркасного типу із легких сталевих тонкостінних конструкцій, полегшених надбудов, підсилення існуючих каркасних будівель проектувальники вирішують різними способами. Одним із варіантів вирішення цього питання є створення підсилених конструкцій, які б надавали більшої жорсткості та міцності несучим елементам будівлі. Базуючись на загальних принципах роботи сталобетонних конструкцій, запропоновано підсилити конструкції з легких сталевих тонкостінних профілів легким полістиролбетоном. Саме створення економічно обґрунтованих надлегких сталезалізобетонних конструкцій з урахуванням усіх позитивних і негативних особливостей кожного з використаних матеріалів на основі тонкостінної листової оцинкованої сталі та легкого полістиролбетону є актуальним питанням сьогодення.

Створення серії зразків було обумовлено висновками дослідження підсилення ЛСТК відкритого профілю легким полістиролбетоном. Переріз зразків з пустих та заповнених полістиролбетоном профілів «С-подібної» форми розмірами 70x40 мм та «U-подібної» форми (профіль розмірами 70x50 мм товщиною 0.42 мм та довжиною по 400 мм і 1500 мм).

При цьому були виявлено такі закономірності:

- при надлегкому бетоні від 100 кг/м³ до 400 кг/м³ суттєвого підсилення металевого профілю не відбувалося, на що вказує характер руйнування (рис. 1, б) – втрата місцевої стійкості та показники руйнівних зусиль, які відрізняються від непідсиленого профілю на 3-5 %, що не є досить значним показником;

- при легкому бетоні від 500-900 кг/м³ відбувався перехід від місцевої втрати стійкості до загальної (рис. 1, в), показники руйнівних зусиль у межах 10-20 %, що є кращим, ніж попередній, але

водночас не є економічно вигідним підсиленням;

- при використанні бетонів вагою понад 900 кг/м^3 застосування полістирол-

бетону як конструкційного легкого бетону не є доцільним.

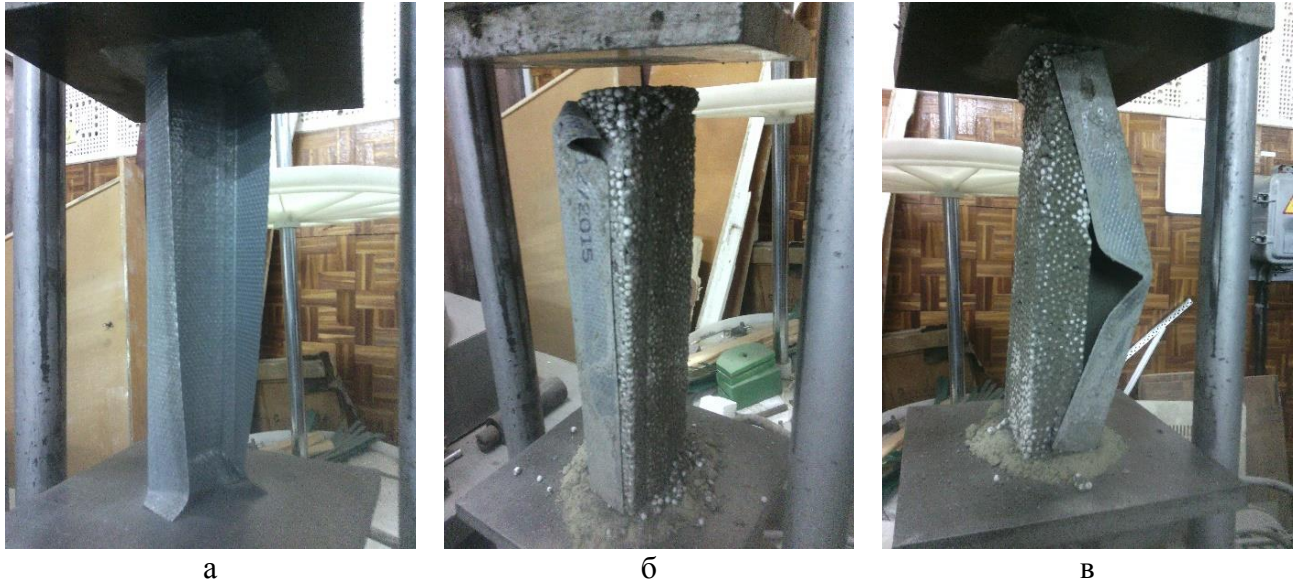


Рис. 1. Результати випробувань елементів з легких сталевих тонкостінних профілів, підсилених полістиролбетоном:

а – руйнування непідсиленого профілю; б – руйнування профілю, підсиленого полістиролбетоном, $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$; в – руйнування профілю, підсиленого полістиролбетоном, $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$

У результаті випробувань виявлено, що сумісна робота двох матеріалів (сталевий профіль відкритого типу і легкого полістиролбетону) дає незначний відсоток збільшення несучої здатності непідсиленого відкритого профілю.

З урахуванням отриманих результатів розроблено експериментальні зразки у вигляді замкнутих складених профілів, заповнених полістиролбетоном. Загальний вигляд досліджуваних зразків зображено на рис. 2.

Для підсилення складеного профілю застосовано легкий полістиролбетон класу середньої густини D800. Міцність бетону підібрано з урахуванням міцності заклепкових з'єднань профілів. Міцність бетону на стиск становила $0,12 \text{ кН/см}^2$.

Експериментально досліджувалися чотири типи елементів (рис. 2):

1-й тип – складений пустий профіль, $l = 400 \text{ мм}$;

2-й тип – складений профіль, заповнений легким бетоном, $l = 400 \text{ мм}$;

3-й тип – складений пустий профіль, $l = 1500 \text{ мм}$;

4-й тип – складений профіль, заповнений легким бетоном, $l = 1500 \text{ мм}$.

Експериментально було визначено характер руйнування сталобетонних зразків (рис. 3) та ефективність підсилення легким бетоном. При центральному стиску навантаження прикладалося на весь переріз зразків. Показники міцності зразків подано у табл. 1.



$L=400$ мм

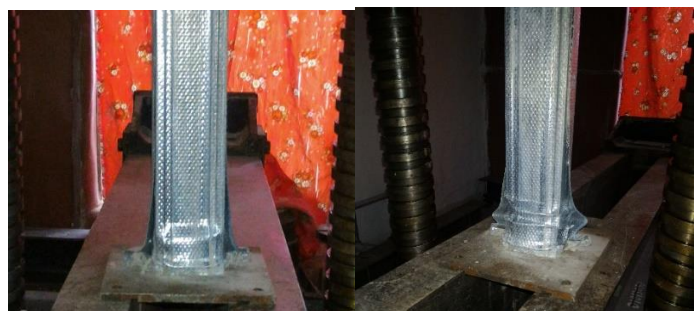


$L=1500$ мм

Рис. 2. Сталобетонні зразки складеного прямокутного перерізу, заповнені полістиролбетоном



а



б

Рис. 3. Характер руйнування сталобетонних зразків:
а – оголовок стійок; б – база стійок

Таблиця 1

Порівняння результатів експериментальних досліджень сталобетонних стійок

Найменування характеристик	Поздовжнє зусилля стиску N , кН			
	1-й тип	2-й тип	3-й тип	4-й тип
Початок втрати стійкості конструкції	12,5	30,1	10,7	20,1
Максимальні значення несучої здатності конструкції	18,1	34,20	14,3	23,5

Після підсилення полістиролбетоном показники міцності зростали. Спостерігалася втрата місцевої стійкості зовнішнього профілю з подальшим розкриттям з'єднання складеного перерізу. Руйнування відбувалося на приопорних ділянках бази та оголовка зразка. Міцність бетону на центральний стиск була досить малою, але з урахуванням характеру

руйнування, міцності бетону вистачає для підсилення металевих профілю, стінки і полочки профілю втрачають стійкість при значно більших навантаженнях.

Наступним етапом досліджень було виготовлення та експериментальне дослідження просторової конструкції, загальний вигляд досліджуваних зразків зображено на рис. 4.

Просторові колони

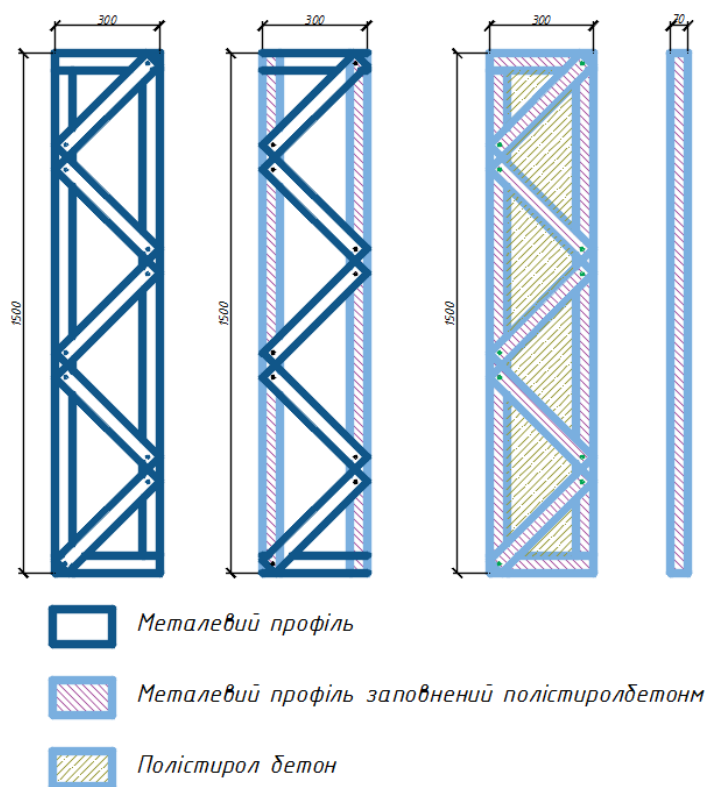


Рис 4. Схема просторової конструкції

Експериментально досліджувалися три типи елементів:

1-й тип – пустий оцинкований профіль просторової конструкції;

2-й тип – стійки просторової конструкції замкнутого профілю, заповнені легким бетоном;

3-й тип – просторова конструкція із оцинкованого профілю, заповнена легким бетоном.

Просторові конструкції випробовувалися на центральний стиск. Форму

руйнування зразків подано на рис. 5. Показники міцності зразків наведені у табл. 2.

Зразки просторової конструкції із підсиленнями легким бетоном стійками (тип 2) у порівнянні з металевією просторовією конструкцією (тип 1) мають на 37 % вищі показники міцності на стадії початкової втрати стійкості і на 39 % на стадії максимальних руйнівних зусиль.

Таблиця 2

Порівняння результатів експериментальних досліджень просторових конструкцій

Найменування характеристик	Поздовжнє зусилля стиску N , кН		
	1-й тип	2-й тип	3-й тип
Початок втрати стійкості конструкції	16,5	26,2	34,8
Максимальні значення несучої здатності конструкції	25,3	41,5	52,1



а



б



в

Рис. 5. Характер руйнування зразків просторових конструкцій:
а – 1-й тип; б – 2-й тип; в – 3-й тип

Характеристики міцності зразків просторової конструкції із повним обетонуванням (тип 3) у порівнянні із металевою просторовою конструкцією (тип 1) на 52,6 % вищі на стадії початкової втрати стійкості і на 51,44 % на стадії максимальних руйнівних зусиль.

Міцність зразків просторової конструкції із повним обетонуванням (тип 3) у порівнянні із зразками просторової конструкції із підсиленими легким бетоном стійками (тип 2) на 24,7 % вищі на стадії початкової втрати стійкості і на 20,3 % на стадії максимальних руйнівних зусиль.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження тонкостінних профілів відкритого типу, підсилених полістирол-

бетоном, дали змогу зробити висновок про недостатню сумісну роботу відкритого профілю та полістиролбетону і вказали на доцільність використання легких тонкостінних профілів закритого контуру із двох або більше металевих профілів, підсилених полістиролбетоном.

Результати експериментальних досліджень відображають реальну роботу сталобетонних конструкцій з урахуванням підсилення як окремих елементів, так і усєї конструкції. Характер руйнування обумовлює розрахунок даних конструкцій з урахуванням сумісної роботи кожного з матеріалів. Наведені результати дослідження характеризують високу ефективність даного виду підсилення.

Список використаних джерел

1. Сопротивление теплопередаче трехслойных железобетонных панелей [Текст] / В. И. Большаков, А. М. Сопильняк, Е. Л. Юрченко, Н. В. Панченко // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Днепропетровск : ПГАСА, 2015. – Вып. 82. – С. 50–54.
2. Savitskiy, N. V. Strength and Crack Resistance of Three-Layer Concrete Beams [Text] / N. V. Savitskiy, A. M. Sopilnyak // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Днепропетровск : ПГАСА, 2013. – Вып. 68. – С. 363–367.
3. Горшков, А. С. Моделирование процессов нестационарного переноса тепла в стеновых конструкциях из газобетонных блоков [Текст] / А. С. Горшков, П. П. Рымкевич, Н. И. Ватин // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 8 (52). – С. 38–48.
4. Computational assessment of thermal performance of contemporary ceramic blocks with complex internal geometry in building envelopes [Text] / J. Kočí, J. Maděra, M. Jerman, R. Černý // Energy and buildings. – 2015. – №99. – P. 61–66.
5. Cui H. Development, mechanical properties and numerical simulation of macro encapsulated thermal energy storage concrete [Text] / H. Cui, S.A. Memon, R. Liu // Energy and buildings. – 2015. – № 96. – P. 162–174.
6. Семко, А. В. Легкие сталежелезобетонные конструкции [Электронный ресурс] / А. В. Семко, Ю. А. Авраменко // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2011. – Режим доступа : <http://ramag.ru/prensa/light-sjb-constr>.
7. Лещенко, М. В. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона / М. В. Лещенко, В. О. Семко // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 8. – С. 44–55. – DOI: 10.5862/МСЕ.60.6.

Семко Олександр Володимирович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри архітектури та міського будівництва Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел. (050) 30-50-970. E-mail: al.vl.semko@gmail.com.

Магас Наталія Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри архітектури та міського будівництва Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел. (050) 02-41-531. E-mail: mahasnataliia@gmail.com.

Сіробаба Віталій Олексійович, аспірант кафедри архітектури та міського будівництва Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел. (066) 84-65-983. E-mail: vitalij.sirobaba@gmail.com.

Семко Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой архитектуры и городского строительства Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. (050) 30-50-970. E-mail: al.vl.semko@gmail.com.

Магас Наталья Николаевна, канд. техн. наук, доцент кафедры архитектуры и городского строительства Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. (050) 02-41-531. E-mail: mahasnataliia@gmail.com.

Сиробаба Виталий Алексеевич, аспирант, кафедра архитектуры и городского строительства Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. (066) 84-65-983. E-mail: vitalij.sirobaba@gmail.com.

Semko Oleksandr Volodymyrovych, Doctor of Science, Professor, Head of Architecture and Urban Construction Department, Poltava National Technical Kondratuk University. Tel. (050) 30-50-970. E-mail: al.vl.semko@gmail.com.
Mahas Nataliia Nikolayevna, candidate of technical sciences, associate professor, Architecture and Urban Construction Department, Poltava National Technical Kondratuk University. Tel. (050) 02-41-531. E-mail: mahasnataliia@gmail.com.
Sirobaba Vitaliy Alekseevich, postgraduate, Architecture and Urban Construction Department, Poltava National Technical Kondratuk University. Tel. (066) 84-65-983. E-mail: vitalij.sirobaba@gmail.com.

Статтю прийнято 25.05.2018 р.

УДК 624.196

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ СБОРНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБДЕЛКИ НАПОРНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ

Д-р техн. наук А. И. Вайнберг (ЧАО «Укргідропроєкт»)

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ ЗБІРНОГО ЗАЛІЗОБЕТОННОГО ОБЛИЦЮВАННЯ НАПІРНОГО ГІДРОТЕХНІЧНОГО ТУНЕЛЮ

Д-р техн. наук О. І. Вайнберг (ПАТ «Укргідропроєкт»)

METHOD FOR CALCULATING REINFORCED CONCRETE LINING OF A PRESSURE HYDRAULIC TUNNEL

Dr. sc. science O. I. Vaynberg

Предложена методика расчетов сборной железобетонной обделки напорного гидротехнического туннеля. Разработаны расчетные схемы, которые следует использовать при определении напряженно-деформированного состояния рассматриваемой обделки. Учитываются особенности работы обделки в строительный, эксплуатационный и ремонтный периоды. Выполнены расчеты по обоснованию конструкции сборной железобетонной обделки строящегося в настоящее время туннеля ГЭС Мтквари в Грузии.

Ключевые слова: напорный гидротехнический туннель, сборная железобетонная обделка, расчетные схемы, критерии механической и фильтрационной прочности.

Запропоновано методіку розрахунків збірного залізобетонного облицювання напірного гідротехнічного тунелю. Розроблено розрахункові схеми, які слід використовувати при визначенні напружено-деформованого стану розглянутого облицювання. Враховуються особливості роботи облицювання в будівельний, експлуатаційний і ремонтний періоди. Виконано розрахунки з обґрунтування конструкції збірного залізобетонного облицювання тунелю ГЕС Мткварі в Грузії, що будується у цей час.

Ключові слова: напірний гідротехнічний тунель, збірне залізобетонне облицювання, розрахункові схеми, критерії механічної та фільтраційної міцності.

The analysis of structural features and operating conditions of the prefabricated reinforced concrete lining of a pressure hydraulic tunnel was carried out. The requirements to be met by the elements of the lining in question – tubing and anti-filtration seals in the longitudinal joints between the tubings are formulated. Features of determining loads and impacts on the tunnel lining in question during the construction, operational and repair periods are analyzed. Design diagrams that should be used to determine the stress-strain state of the lining in question during these periods are developed. A technique for calculating the stress-strain state of the system «lining – an array of rocks» is proposed. The criteria, which ensure the mechanical strength of the tubings and their joints, are formulated. The condition providing the design mode of operation of the anti-filtration elements in the longitudinal joints between the tubes is recorded. The results of calculations for justifying the design of prefabricated reinforced concrete lining of pressure derivation tunnel of Mtkvari HPP in Georgia, under construction at the moment, are presented.

Key words: *pressure hydraulic tunnel, prefabricated reinforced concrete lining, design diagrams, criteria for mechanical and filtration strength.*

Введение. Напорные туннели находят широкое применение в гидротехническом строительстве. Они используются в качестве подводящих водоводов ГЭС и ГАЭС, закрытых водосбросов гидроузлов и в других случаях. Обычно принимается круглое поперечное сечение таких туннелей.

Традиционно в напорных гидротехнических туннелях устраиваются монолитные обделки: бетонные, железобетонные, сталежелезобетонные. Следует отметить, что основной нагрузкой на обделку напорного туннеля является внутреннее давление воды, которое включает статическое давление, давление гидравлического удара и пульсационное давление потока воды в туннеле. В действующих в Украине и в России нормах проектирования и в технической литературе подробно освещены вопросы расчетов и конструирования монолитных обделок напорных гидротехнических туннелей [1–7 и др.].

В настоящее время строительство туннелей осуществляется современными туннелепроходческими комплексами, которые имеют высокую производительность, что позволяет проходить туннельную выработку со скоростью до 60 м в сутки и более. При этом обычно используются сборные железобетонные обделки, которые чаще всего применяются при строительстве транспортных туннелей. Основные особенности сборных железобетонных обделок туннелей связаны с использованием специальных сборных железобетонных элементов – тюбингов. Конструкции тюбингов должны обеспечивать достаточную точность их монтажа, а также возможность устройства противифльтрационных уплотнений, которые должны обеспечить водонепроницаемость обделки. Следует

отметить, что современные туннелепроходческие комплексы позволяют полностью механизировать все работы, связанные с устройством туннеля, в том числе: проходку выработки, монтаж сборных железобетонных элементов обделки (тюбингов), заполнение затюбингового пространства и др.

При устройстве монолитных обделок, которые обычно применяются в напорных гидротехнических туннелях, приходится снижать скорость проходки туннеля с тем, чтобы бетон обделки мог набрать требуемую прочность для восприятия нагрузок строительного периода, в частности, горного давления. Имеются также некоторые другие технологические трудности, которые приходится преодолевать при строительстве монолитных обделок туннелей.

Для сокращения сроков строительства напорных гидротехнических туннелей, которые выполняют в достаточно прочных горных породах, в ряде случаев целесообразно использовать сборные железобетонные обделки, что обеспечивает высокую скорость их устройства. В последние годы такие обделки все чаще применяются при строительстве напорных гидротехнических туннелей. Примером может служить сборная железобетонная обделка подводящего напорного туннеля ГЭС Gibe II в Эфиопии. Этот туннель имеет внутренний диаметр 6.3 м и длину 25.8 км [8].

При обосновании типа обделки напорного туннеля необходимо учитывать следующие отличия в работе монолитных и сборных обделок на внутреннее давление воды. При устройстве монолитных обделок внутреннее давление воды частично воспринимается самой обделкой, а частично передается на массив горных пород. В нормах проектирования гидротехнических туннелей подробно

изложена методика расчетов таких обделок напорных гидротехнических туннелей [3 – 5]. Главной особенностью условий работы сборной железобетонной обделки является то, что внутреннее давление воды передается тубингами на поверхность выработки и полностью воспринимается массивом горных пород.

В нормах проектирования указывается, что применение сборных железобетонных обделок напорных туннелей требует обоснования. Однако в этих нормах не приведена методика и критерии, которые должны использоваться при выполнении такого обоснования. Анализ имеющейся технической литературы показал, что до настоящего времени отсутствуют общепринятые подходы к выполнению расчетов при проектировании сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей. Целью настоящей работы является разработка методики выполнения таких расчетов.

Необходимость разработки такой методики связана с проектированием в ЧАО «Укргидропроект» строящейся в настоящее время ГЭС Мктвари в Грузии. ГЭС установленной мощностью 46.4 МВт расположена на реке Мктвари (Куре). В состав этой ГЭС входит напорный деривационный туннель со сборной железобетонной обделкой. Длина туннеля 9.6 км, внутренний диаметр 5.26 м, толщина обделки 0.25 м, уклон туннеля 0.5 ‰. Для проходки туннеля применяется высокопроизводительный туннелепроходческий комплекс Double Shield Hard Rock TBM роторного типа диаметром 6.00 м производства Германии.

Особенности конструкций и условий работы сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей. Рассмотрим сначала особенности конструкций и монтажа сборных обделок туннеля.

Кольцо сборной железобетонной обделки туннеля обычно состоит из шести

тубингов: донный тубинг, 4 боковых, верхний тубинг. На рис. 1 показана конструкция сборной железобетонной обделки туннеля ГЭС Мктвари. Размер кольца вдоль туннеля составляет 1.5 м. Опираение тубингов друг на друга осуществляется по опорным площадкам. Размеры таких площадок обычно меньше размеров поперечного сечения тубинга. Для обделки туннеля ГЭС Мктвари ширина площадки равна 0.15 м при толщине тубинга 0.25 м, длина площадки вдоль туннеля равна 1.3 м при длине тубинга 1.5 м.

Эта конструкция является типичной для такого типа обделок. Отличаться могут размеры тубингов в зависимости от диаметра туннеля, инженерно-геологических условий по его трассе и других факторов.

Каждый тубинг на торцевых поверхностях в кольцевом и продольном направлениях имеет фиксаторы для обеспечения точности сборки. Во всех тубингах предусмотрены отверстия для нагнетания инъекционного раствора за обделку.

Предусматриваются конструктивные меры для предотвращения фильтрации воды из туннеля, если внутреннее давление в туннеле в эксплуатационный период превышает наружное давление грунтовых вод, а также для предотвращения фильтрации воды в туннель в строительный и ремонтный периоды. Для этого устраивается гидроизоляция продольных стыков между тубингами и поперечных вертикальных стыков между кольцами с помощью резиновых противофильтрационных элементов. Каждый такой элемент устанавливается в специальные пазы в торцах соседних тубингов со стороны туннельной выработки (рис. 2). При монтаже тубингов обычно осуществляется обжатие противофильтрационного уплотнения в кольцевом направлении с помощью болтов.

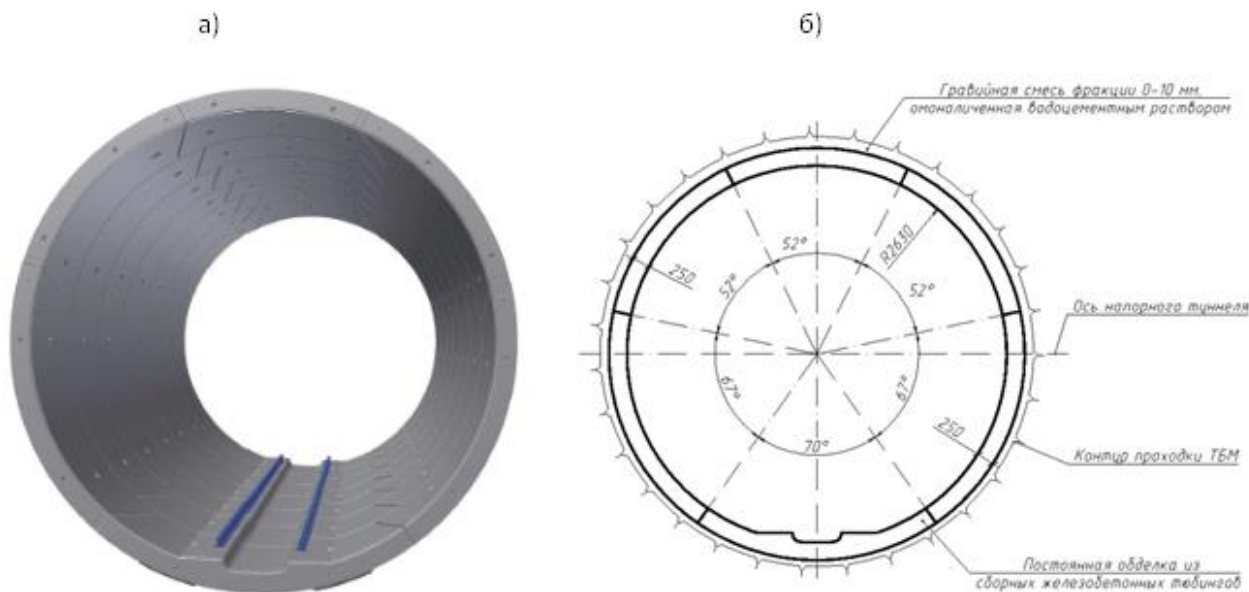


Рис. 1. Конструкция сборной железобетонной обделки напорного туннеля ГЭС Мтквари в Грузии
 а – перспективное изображение; б – типовое поперечное сечение

Для удобства монтажа наружный диаметр состоящего из тюбингов кольца принимается меньшим, чем диаметр контура выработки (рис. 1, б). Образующееся затюбинговое пространство заполняется

гравийной смесью с последующим омоноличиванием ее водоцементным раствором на сульфатостойком цементе через отверстия, предусмотренные в тюбингах (образуется заполнительный бетон).

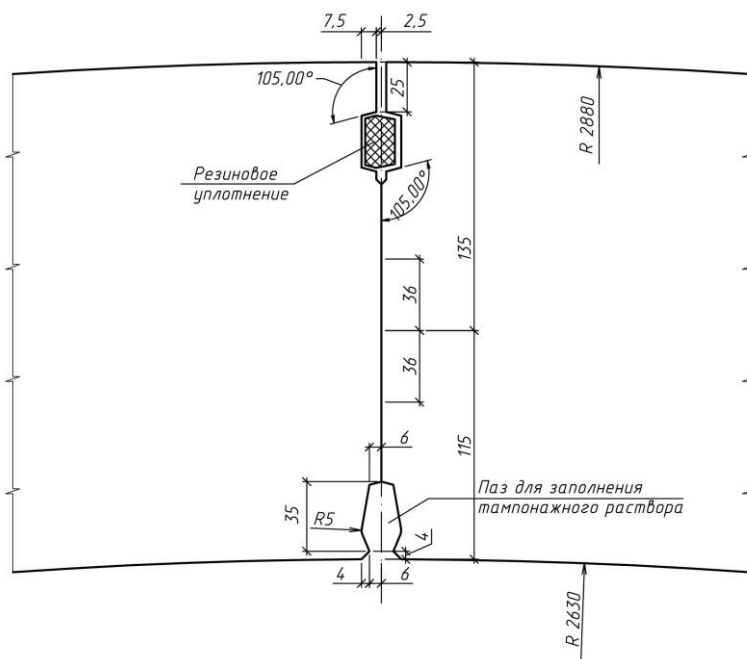


Рис. 2. Конструкция продольного контакта тюбингов

Водоцементный раствор нагнетается через отверстия для цементации последовательно снизу вверх по обе стороны от вертикальной оси туннеля под небольшим давлением, не превышающим 0.4 МПа.

После набора бетоном затюбингового пространства достаточной прочности (не менее 70 %) выполняется его уплотнительное инъецирование. Это необходимо для заполнения трещин в породах, вмещающих туннель, а также для заполнения трещин в слоях первичного нагнетания, возникающих в результате усадочных явлений цементного раствора и деформаций обделки. Уплотнительное инъецирование обычно производится под давлением до 1.0 МПа через скважины, которые заглубляются в массив горных пород на глубину до 0.5 м.

В торцах тюбингов с внутренней стороны туннеля предусматриваются пазы, которые после завершения работ заполняются тампонажным раствором.

Опираение тюбингов друг на друга осуществляется по опорным площадкам, ширина которых для обделки туннеля ГЭС Мтквари составляет 0.15 м, длина вдоль туннеля – 1.30 м (на 0.20 м меньше длины тюбинга).

Рассмотрим теперь особенности условий работы сборных обделок напорных туннелей в строительный, эксплуатационный и ремонтный периоды.

В строительный период на 1-м этапе до омоноличивания гравийной смеси в затюбиновом пространстве на сборную обделку туннеля в общем случае действуют нагрузки от собственного веса обделки, веса гравийной смеси, горного давления и сейсмических воздействий. На 2-м этапе строительного периода дополнительно будет действовать давление уплотнительной цементации, которое будет передаваться на обделку через бетонное кольцо, образованное после омоноличивания гравийной смеси. Для безопасного восприятия обделкой усилий, которые вызываются указанными выше

нагрузками, должна быть обеспечена прочность тюбингов и прочность стыков между ними.

В эксплуатационный период после заполнения туннеля водой наиболее опасными нагрузками на обделку туннеля являются следующие нагрузки: внутреннее статическое давление воды, давление гидравлического удара, пульсационное давление потока воды, сейсмическое давление воды. Под действием внутреннего давления воды швы между тюбингами могут раскрываться в кольцевом направлении. Получаемая ширина раскрытия не должна превышать допустимых значений по условию восприятия внутреннего давления воды резиновыми уплотнениями швов между тюбингами. Вследствие взаимодействия сборной обделки с массивом горных пород в сечениях тюбингов возникают изгибающие моменты, продольные и поперечные силы. Следует обеспечить прочность тюбингов под действием этих усилий.

В ремонтный период после опорожнения туннеля на обделку в общем случае действуют следующие нагрузки: собственный вес обделки, вес растрескавшегося бетонного кольца в затюбинговом пространстве, горное давление, внешнее давление подземных вод и сейсмические нагрузки. Эти нагрузки вызывают в сечениях обделки усилия, для безопасного восприятия которых должна быть обеспечена прочность тюбингов и прочность стыков между ними. При этом необходимо учитывать следующее обстоятельство. В эксплуатационный период под действием внутреннего давления воды возникают радиальные перемещения контура выработки, соответствующие упругим деформациям и деформациям ползучести массива горных пород. При опорожнении туннеля в ремонтный период контур выработки не возвращается в исходное положение. Это приводит к изменению статической схемы работы обделки туннеля.

Общие положения методики расчетов сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей. Приведенный анализ особенностей конструкций и условий работы сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей позволяет сделать следующий вывод. Для обоснования надежности и безопасности рассматриваемых обделок туннелей необходимо выполнять расчеты напряженно-деформированного состояния этих конструкций, расчеты механической прочности тюбингов и стыков между ними, фильтрационной прочности противофильтрационных элементов в стыках между тюбингами.

При выполнении этих расчетов в общем случае должны учитываться следующие нагрузки: собственный вес обделки, вес зацементированной гравийной смеси в затюбинговом пространстве, горное давление, внутреннее давление воды в туннеле, включая статическое давление, давление гидравлического удара и пульсационное давление потока воды, давление подземных вод, сейсмические воздействия. Данные о давлении гидравлического удара и пульсационном давлении потока воды обычно предоставляет завод-поставщик турбинного оборудования ГЭС. Нормативные и расчетные значения остальных нагрузок и воздействий определяются в соответствии с требованиями норм проектирования [1–5, 12–14]. Согласно этим нормам нагрузки и воздействия на обделку туннеля должны приниматься в наиболее неблагоприятных, но возможных основных и особых сочетаниях.

Расчеты должны выполняться отдельно для строительного, эксплуатационного и ремонтного периодов.

При выполнении расчетов ввиду большой длины туннеля целесообразно ограничиться рассмотрением плоских задач.

Расчеты напряженно-деформированного состояния обделки для каждого расчетного периода следует выполнять в соответствии со своей, специально

разрабатываемой, расчетной схемой, моделирующей систему “обделка – массив горных пород”. При разработке расчетных схем необходимо учитывать характер взаимодействия обделки с массивом горных пород, а также деформационные характеристики материалов тюбингов и окружающего массива горных пород, включая упругие характеристики и характеристики, описывающие ползучесть. Ввиду сложности расчетных схем и условий работы обделки расчеты ее напряженно-деформированного состояния целесообразно выполнять численным методом – методом конечных элементов с использованием компьютерных программ. Ниже на примере обделки туннеля ГЭС Мтквари с использованием программного комплекса «Лира 10.4» показаны подходы, которые следует применять при разработке расчетных и конечно-элементных схем сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей. Приведены примеры расчетов напряженно-деформированного состояния обделки с использованием этих схем.

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния обделки являются исходными данными для выполнения расчетов механической прочности тюбингов и стыков между ними, а также фильтрационной прочности противофильтрационных элементов в стыках между тюбингами. Методика этих расчетов и критерии прочности конструктивных элементов должны учитывать требования действующих норм проектирования [3–5, 9–11], а также особенности конструкции и условий работы сборной обделки в расчетные периоды. Основные положения такой методики и критерии прочности конструктивных элементов обделки приведены ниже.

Расчетная схема для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния обделки в строительный период. Принимается расчетная схема в виде плоского криволинейного замкнутого

стержня на упругом основании, очерченного по круговой оси тубинговой обделки туннеля. Стержень аппроксимируется плоскими стержневыми конечными элементами. В местах стыков тубингов предусмотрены стыковочные стержневые элементы, моделирующие опорные площадки. Для связи с основанием используются расположенные радиально абсолютно жесткие стержневые конечные элементы, имеющие длину, равную половине толщины обделки. Основание моделируется одноузловыми конечными элементами односторонней упругой связи в радиальном направлении нормально к контуру выработки. Считается, что эти элементы основания работают только на сжатие. Их жесткость определяется с учетом коэффициента удельного отпора в соответствии с нормами проектирования [3–5]. Тангенциальный к контуру выработки упругий отпор не учитывается.

Считается, что моделирующий обделку стержень загружен следующими нагрузками: собственный вес тубингов, вес бетона затубингового пространства, горное давление, давление цементации, сейсмические воздействия. Внешние нагрузки передаются в узлы стержня с помощью специальных плоских стержневых элементов нулевой жесткости. Такие элементы располагаются между узлами абсолютно жестких элементов по внешней контуру обделки.

Конечно-элементная расчетная схема обделки (с учетом симметрии относительно вертикальной оси сечения туннеля и нагрузок) для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в строительный период показана на рис. 3, а. На рис. 3, б показан фрагмент конечно-элементной расчетной схемы в зоне стыка верхнего и бокового тубингов.

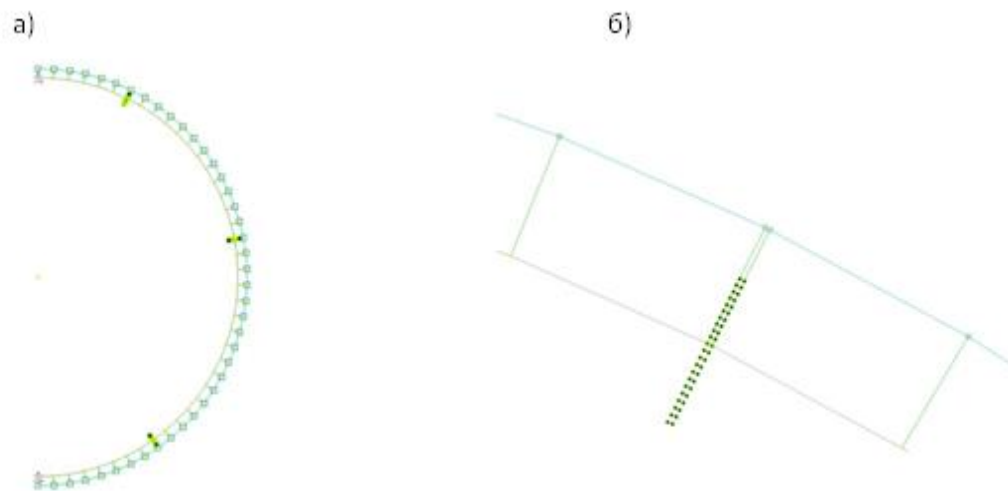


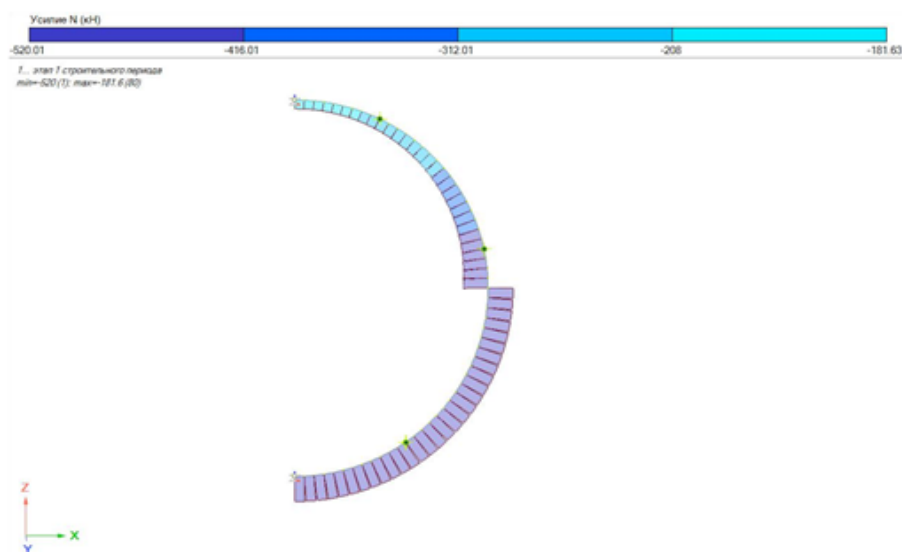
Рис. 3. Конечно-элементная расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в строительный период:

- а – конечно-элементная схема с учетом симметрии относительно вертикальной оси туннеля;
б – фрагмент конечно-элементной расчетной схемы в зоне стыка верхнего и бокового тубингов

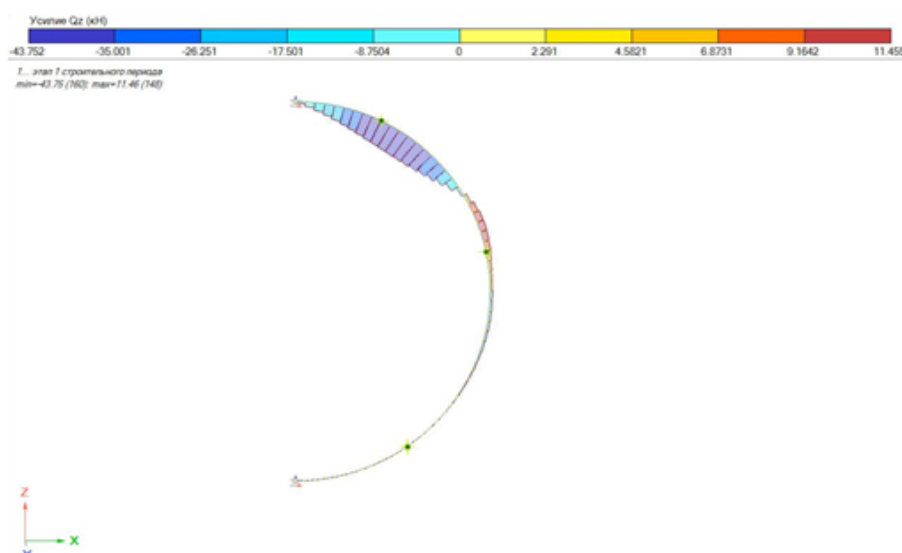
На рис. 4 для примера приведены результаты расчетов по определению усилий в сечениях тубингов обделки ГЭС Мтквари в строительный период. Показаны эпюры продольных сил, поперечных сил,

изгибающих моментов для расчетного случая при основном сочетании следующих нагрузок: собственный вес тубингов, вес бетона затубингового пространства, горное давление.

а)



б)



в)

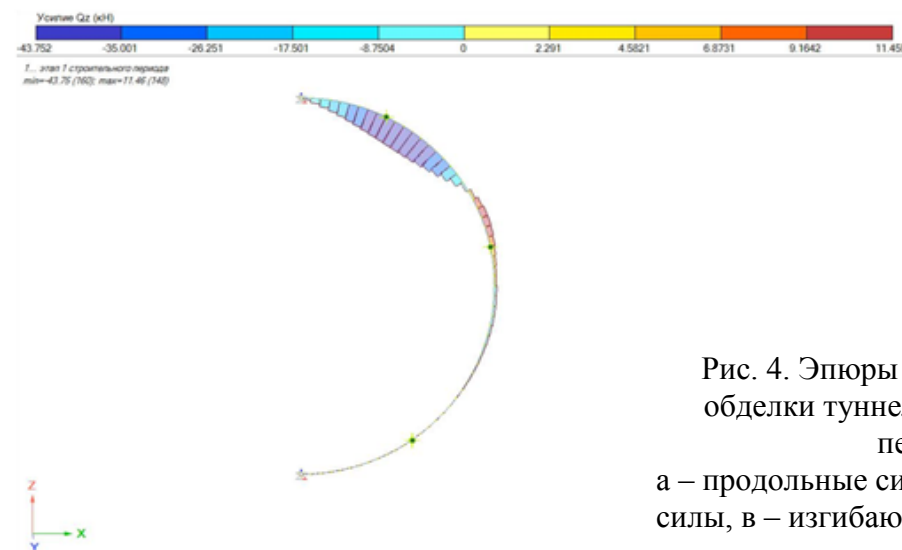


Рис. 4. Эпюры усилий в сечениях обделки туннеля в строительный период:
а – продольные силы; б – поперечные силы, в – изгибающие моменты

Расчетная схема для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния обделки в эксплуатационный период. При выполнении этих расчетов рассматривается расчетная область достаточно больших размеров с тем, чтобы исключить влияние граничных условий на напряжения в обделке. Ввиду симметрии туннеля и нагрузок относительно верти-

кальной оси в расчетную область достаточно включить половину туннеля с прилегающим массивом горных пород. На рис. 5 представлена конечно-элементная расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в эксплуатационный период.

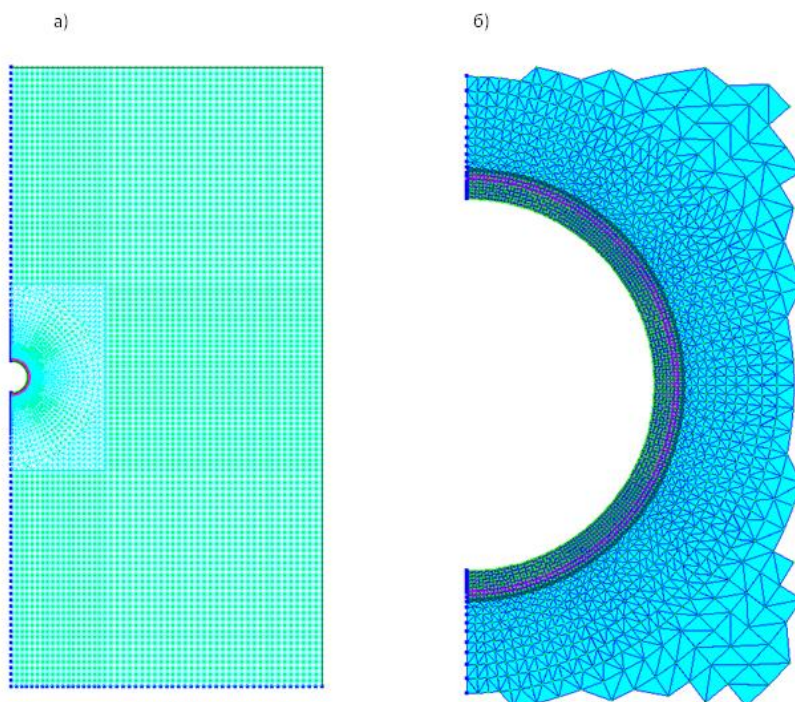


Рис. 5. Конечно-элементная расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в эксплуатационный период: а – конечно-элементная схема с учетом симметрии относительно вертикальной оси туннеля; б – фрагмент конечно-элементной расчетной схемы вблизи обделки туннеля

Для определения напряженно-деформированного состояния в пределах расчетной области решается плоская упругопластическая задача для системы «обделка – массив горных пород». Массив горных пород рассматривается как упругопластический материал в соответствии с моделью Мора-Кулона. Железобетон обделки рассматривается как упругий материал. Учитывается наличие швов между тубингами. Бетон

затюбингового пространства считается упругопластическим материалом.

Принята такая последовательность расчетов.

Сначала определяется естественное напряженное состояние массива горных пород до проходки туннеля под действием собственного веса грунтов.

Далее определяется изменение напряженно-деформированного состояния

массива горных пород вследствие проходки туннеля.

Затем в пределах выработки устанавливается тубинговая обделка и укладывается бетон затубингового пространства, что обеспечивает связь между обделкой и массивом горных пород.

После этого для рассматриваемых эксплуатационных расчетных случаев определяется напряженно-деформированное состояние системы «обделка – массив горных пород» под действием внутреннего давления воды, включая статическое давление, давление гидравлического удара, пульсационное давление потока воды, сейсмическое давление воды.

В результате расчетов определяется напряженно-деформированное состояние системы «обделка – массив горных пород», включая значения ширины раскрытия межтубинговых швов в кольцевом

направлении и значения напряжений в сечениях тубингов. По полученным значениям напряжений численным интегрированием определяются усилия в сечениях тубингов – изгибающие моменты, продольные и поперечные силы. Эти усилия используются в дальнейшем для выполнения расчетов прочности тубингов.

На рис. 6 для примера приведены результаты расчетов по определению напряжений в сечениях тубингов обделки ГЭС Мтквари в эксплуатационный период. Показаны изополя радиальных, кольцевых и касательных напряжений в сечениях тубингов для расчетного случая при основном сочетании следующих нагрузок: внутреннее статическое давление воды при нормальном подпорном уровне в водохранилище, давление гидравлического удара и пульсационное давление потока воды при нормальной эксплуатации ГЭС.

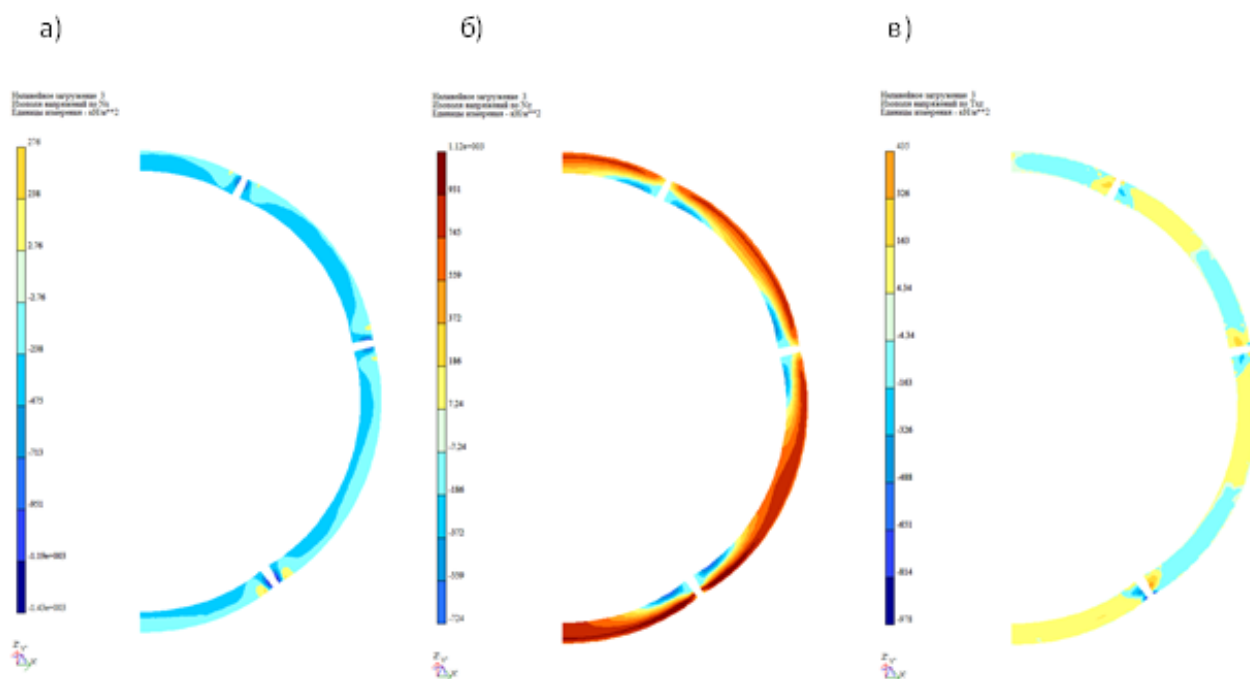


Рис. 6. Эпюры напряжений в сечениях обделки в эксплуатационный период:
 а – радиальные напряжения; б – кольцевые напряжения;
 в – касательные напряжения

Расчетная схема для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния обделки в ремонтный период.

При выполнении расчетов по определению усилий в сборной обделке туннеля в ремонтный период принимается расчетная схема, аналогичная той, которая использовалась при выполнении расчетов в строительный период. Вносятся некоторые коррективы в расчетную схему, связанные со следующими обстоятельствами.

Считается, что вмещающий туннель массив горных пород обладает упругими свойствами и свойствами ползучести. Предполагается, что деформации ползучести в этом массиве являются затухающими.

При заполнении туннеля водой в начале эксплуатационного периода под действием внутреннего статического давления воды на контуре выработки возникнут упругие радиальные перемещения. С течением времени вследствие ползучести радиальные перемещения контура выработки будут увеличиваться и достигнут предельных значений через некоторый промежуток времени.

В ремонтный период при опорожнении туннеля возникнут радиальные перемещения контура выработки, направленные к центру сечения туннеля. Однако останутся вызванные ползучестью радиальные перемещения контура выработки. При этом будет иметь место увеличение длины контура выработки по сравнению с исходной длиной. Следовательно, между тубингами после опорожнения туннеля обязательно останутся раскрытыми контактные швы.

Под действием вертикальных нагрузок (собственного веса тубингов и вертикального горного давления) раскрывшиеся контактные швы между нижним и боковыми тубингами закроются. В этом случае горизонтальная проекция верхнего тубинга станет меньше горизонтального расстояния между осями верхних опор боковых тубингов и верхний

тубинг опустится. При этом будет иметь место смещение центров тяжести опор верхнего тубинга относительно центров тяжести опор боковых тубингов. Окончательное положение элементов обделки с учетом перемещений, вызванных ползучестью горных пород, при известных значениях этих перемещений может быть определено с помощью несложных геометрических построений.

Расчетная схема, моделирующая обделку туннеля в ремонтный период, принимается в виде плоского криволинейного замкнутого стержня на упругом основании, очертание которого принимается с учетом перемещений контура выработки, вызванных ползучестью горных пород. Эти перемещения должны быть также учтены при моделировании опорных площадок тубингов. Упругое основание моделируется так же, как и в расчетной схеме, которая используется при выполнении расчетов обделки туннеля в строительный период.

В ремонтный период учитываются следующие нагрузки, действующие на моделирующий обделку стержень: собственный вес тубингов, вес бетона затубингового пространства, горное давление, давление подземных вод, сейсмические воздействия.

Конечно-элементная расчетная схема обделки (с учетом симметрии относительно вертикальной оси сечения туннеля и нагрузок) для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в ремонтный период показана на рис. 7, а. На рис. 7, б показан фрагмент этой схемы в зоне стыка верхнего и бокового тубингов.

На рис. 7, б видно смещение оси стержня, моделирующего верхний тубинг, относительно оси стержня, моделирующего боковой тубинг. Такого смещения нет в расчетной схеме для определения напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в строительный период (см. рис. 3, б).

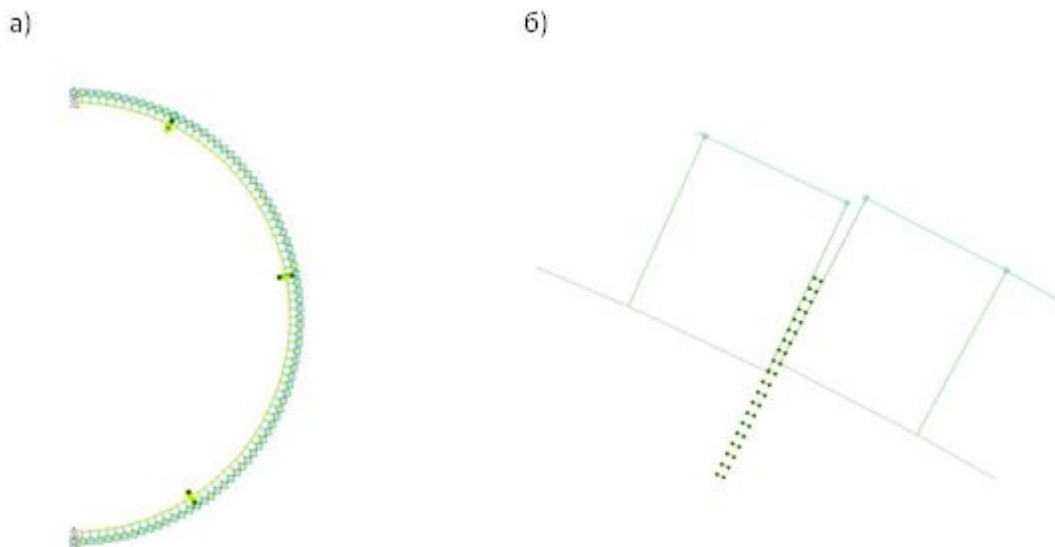


Рис. 7. Конечно-элементная расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в ремонтный период:

а – конечно-элементная схема с учетом симметрии относительно вертикальной оси туннеля;
 б – фрагмент конечно-элементной расчетной схемы в зоне стыка верхнего и бокового тюбингов

На рис. 8 для примера приведены результаты расчетов по определению усилий в сечениях тюбингов обделки ГЭС Мтквари в ремонтный период. Показаны эпюры продольных сил, поперечных сил, изгибающих моментов для расчетного случая при основном сочетании следующих нагрузок: собственный вес тюбингов, вес бетона затюбингового пространства, горное давление, давление подземных вод.

Методика расчетов прочности элементов сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей. Критерии прочности. Расчеты прочности элементов обделок туннелей являются важнейшими расчетами, которые позволяют обосновать надежность и безопасность этих конструкций. Исходными данными для выполнения таких расчетов являются результаты предварительно выполненных расчетов напряженно-деформированного состояния рассматриваемых обделок. Расчеты напряженно-деформированного состояния должны быть выполнены для всей совокупности расчетных случаев,

соответствующих основным и особым сочетаниям нагрузок и воздействий в строительный, эксплуатационный и ремонтный периоды.

Для обоснования надежности и безопасности сборных обделок туннелей необходимо выполнить расчеты механической прочности тюбингов и стыков между ними, а также фильтрационной прочности противofильтрационных элементов в стыках между тюбингами.

Для выполнения этих расчетов необходимы следующие исходные данные.

1. Геометрические размеры элементов обделки (определяются при проектировании).

2. Данные о прочностных характеристиках бетона и арматуры (принимаются при проектировании).

3. Зависимость предельного давления воды, воспринимаемого противofильтрационным элементом, от значения ширины раскрытия стыков между тюбингами (принимаются по данным завода-поставщика).

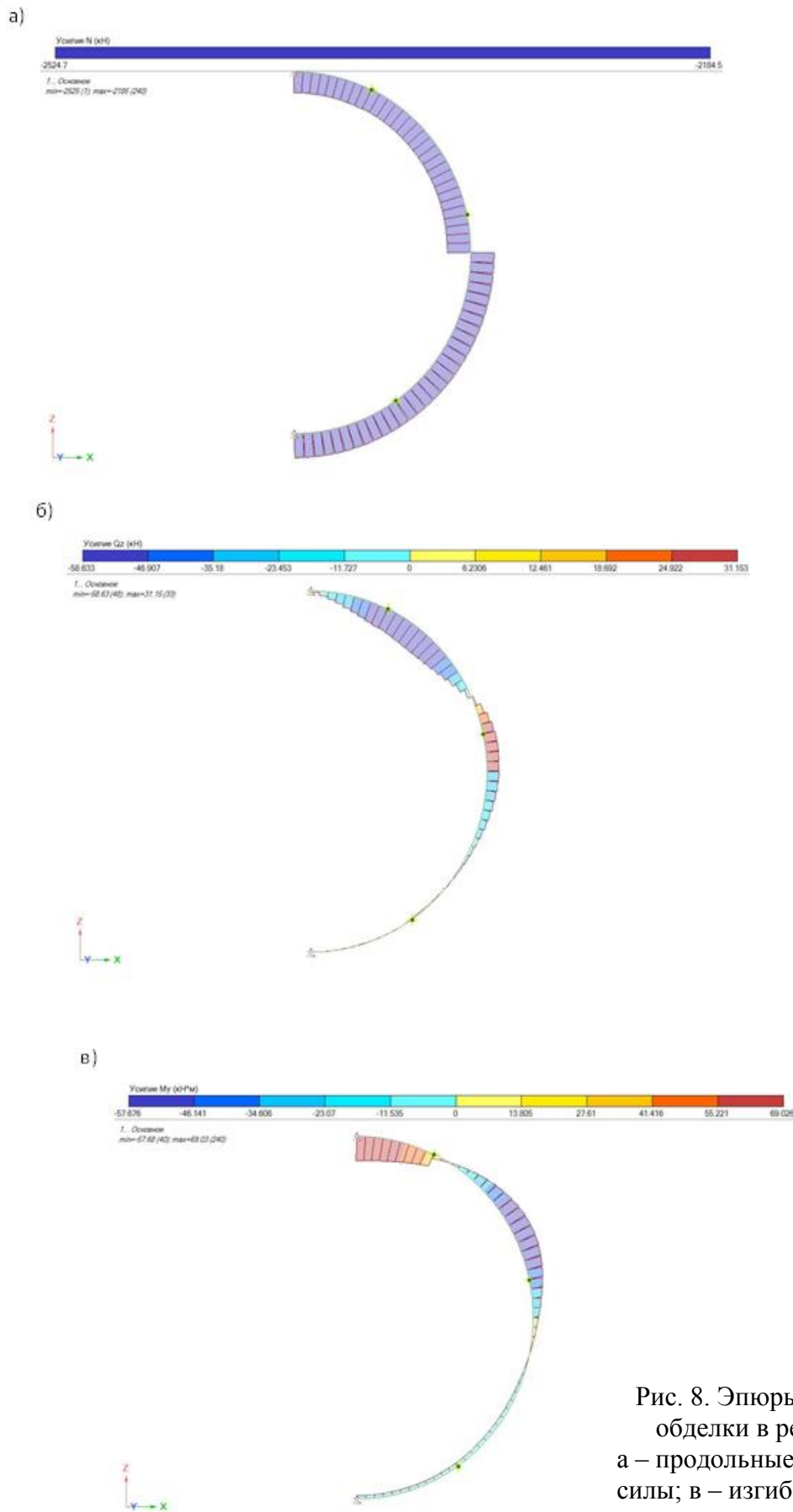


Рис. 8. Эпюры усилий в сечениях обделки в ремонтный период: а – продольные силы; б – поперечные силы; в – изгибающие моменты

4. Результаты предварительно выполненных расчетов напряженно-деформированного состояния обделки:

– усилия в сечениях тубингов – изгибающие моменты, продольные и поперечные силы;

– возникающие в строительный и ремонтный периоды усилия в стыках тубингов – изгибающие моменты, продольные и поперечные силы;

– возникающие в эксплуатационный период взаимные перемещения тубингов в стыках.

Расчеты прочности тубингов, рассматриваемых как железобетонные конструкции, сводятся к определению требуемых площадей сечения рабочей продольной арматуры u внутренней поверхности $A_{si,r}$ и u внешней поверхности $A_{se,r}$, а также поперечной арматуры $A_{sw,r}$. При выполнении таких расчетов следует использовать методику, регламентированную нормами проектирования [9–11]. Необходимо принять такие критерии прочности тубингов:

$$A_{si} \geq A_{si,r}, \quad A_{se} \geq A_{se,r}, \quad A_{si} \geq A_{si,r},$$

где A_{si} , A_{se} , A_{sw} – принятые проектные значения площадей сечения, соответственно, рабочей продольной арматуры u внутренней поверхности и u внешней поверхности тубинга, а также поперечной арматуры.

Кроме того, для тубингов должны быть выполнены расчеты по определению ширины раскрытия трещин a_{cr} , так как эти элементы обделки обычно являются нетрещиностойкими железобетонными конструкциями. Такие расчеты следует выполнять по методике, регламентированной нормами проектирования [3–5, 9–11]. Необходимо принять следующий критерий, обеспечивающий долговечность бетона и сохранность арматуры по условию ограничения ширины раскрытия трещин:

$$a_{cr} \leq a_{cr,u},$$

$a_{cr,u}$ – предельная ширина раскрытия трещин, принимаемая согласно нормам проектирования в зависимости от химического состава воды и градиента напора воды в обделке.

Расчеты прочности стыков между тубингами являются расчетами на местное сжатие (смятие). Методика таких расчетов регламентирована нормами проектирования [9–11]. Критерий, обеспечивающий прочность стыков между тубингами, имеет вид

$$N \leq N_u,$$

где N – расчетное значение продольной силы в стыке тубингов, полученное при выполнении расчетов напряженно-деформированного состояния; N_u – предельное значение продольной силы в стыке тубингов, определяемое в соответствии с нормами проектирования.

Расчеты фильтрационной прочности противотрационных элементов в стыках между тубингами сводятся к сравнению действующего в туннеле внутреннего давления воды p_w с предельным давлением, воспринимаемым противотрационным элементом $p_{w,u}$. Значение $p_{w,u}$ определяется в зависимости от значения ширины раскрытия стыков между тубингами по данным, представленным заводом-поставщиком. Критерий фильтрационной прочности противотрационного элемента обделки, очевидно, следует записать в виде

$$P_w \leq P_{w,u}.$$

В соответствии с изложенной методикой в ЧАО «УкрГидропроект» выполнены расчеты по обоснованию запроектированной конструкции сборной железобетонной обделки напорного

деривационного туннеля строящейся в настоящее время ГЭС Мтквари в Грузии. При выполнении этих расчетов рассматривалась вся совокупность расчетных случаев, соответствующих основным и особым сочетаниям нагрузок и воздействий: 4 для строительного периода, 5 для эксплуатационного периода и 2 для ремонтного периода. Для каждого расчетного случая определялось напряженно-деформированное состояние обделки туннеля, выполнялись расчеты механической прочности железобетонных тубингов и стыков между ними, а также фильтрационной прочности противотрационных элементов.

Выводы:

1. Выполнен анализ особенностей конструкции и условий работы сборной железобетонной обделки напорного гидротехнического туннеля.

2. Предложена методика расчетов, обосновывающих надежность и безопасность рассматриваемой обделки напорного туннеля.

3. Разработаны расчетные схемы, которые следует использовать при определении напряженно-деформированного состояния рассматриваемой обделки в строительный, эксплуатационный и ремонтный периоды.

4. Сформулированы критерии, при выполнении которых обеспечена механическая прочность тубингов и их стыков, а также фильтрационная прочность противотрационных уплотнений в продольных швах между тубингами.

5. Выполнены расчеты по обоснованию конструкции сборной железобетонной обделки строящегося в настоящее время туннеля ГЭС Мтквари в Грузии.

Список использованных источников

1. ДБН В.2.4-3:2010. Гидротехнические сооружения. Основные положения [Текст] / Минрегионстрой Украины. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2010. – 37 с.
2. Свод правил СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения [Текст] : актуализированная редакция СНиП 33-01-2003 / Госстрой России. – М. : Минрегион России, 2011. – 44 с.
3. СНиП 2.06.08-84. Туннели гидротехнические [Текст] / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 19 с.
4. СП 102.13330.2012. Туннели гидротехнические. Актуализированная редакция СНиП 2.06.09-84 [Текст] / Министерство регионального развития Российской федерации. – М. : ООО «Аналитик», 2012. – 52 с.
5. Руководство по проектированию гидротехнических туннелей [Текст] / Всесоюз. проект.-изыскат. и науч.-исслед. ин-т «Гидропроект» им. С. Я. Жука. – М. : Стройиздат, 1982. – 287 с.
6. Рассказов, Л. Н. Гидротехнические сооружения (речные) [Текст] : учеб. для вузов / Л. Н. Рассказов, В. Г. Орехов, Н. А. Анискин [и др.]. – Изд. второе испр. и доп. – М. : Изд-во АСВ, 2011. – Ч. 1. – 584 с.; Ч. 2. – 536 с.
7. Гидротехнические сооружения [Текст] : учеб. пособие для вузов / И. А. Васильева, Г. И. Журавлев, П. Е. Лысенко [и др.]; под ред. Н. П. Розанова. – М. : Стройиздат, 1978. – 647 с.
8. Электронный ресурс. – Режим доступа : http://www.selitunnel.com/pdf_articoli/Articolo_RG_per_sito.PDF.
9. СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений [Текст] : актуализированная редакция / Минрегион России. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 32 с.

10. Свод правил СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений [Текст] / Минэнерго СССР. – М. : ФАУ «ФЦС», 2012 – 67 с.
11. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений (без предварительного напряжения) к СНиП 2.06.08-87 [Текст] : П 46-89 / ВНИИГ. – Л. : Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1991. – 278 с.
12. ДБН В.1.1-12:2006. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України [Текст] / Мінбуд України. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2006. – 84 с.
13. Свод правил СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах [Текст] : СНиП II-7-81* / Минстрой России. – М.: ФАУ «ФЦС», 2014 – 126 с.
14. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений [Текст] (пособие к разделу 5 Гидротехнические сооружения СНиП II-7-81) П 17-85 / ВНИИГ. – Л. : Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1986. – 310 с.

Вайнберг Олександр Ісаакович, д-р техн. наук, професор, замісник генерального директора ПАТ «Укргідропроєкт». Тел. : +380577021513. E-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua.

Вайнберг Александр Исаакович, д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора ЧАО «Укргідропроєкт». Тел. : +380577021513. E-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua.

Vaynberg Oleksandr, Dr. sc. Science, Prof, Deputy General Director of Ukrhidroproject PJSC. Tel. +380577021513. E-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua.

Статтю прийнято 7.06.2018 р.

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 625.144.5

**ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДРІБНОДИСПЕРСНОЇ ВОДИ НА МЕХАНІЗМ
КОРОЗИЙНО-МЕХАНІЧНОГО ЗНОШУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ АГРЕГАТІВ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Д-р техн. наук С. В. Воронін, канд. техн. наук О. О. Скорик,
асист. І. Ю. Сафонюк, старш. викл. О. В. Росляков (НАНГУ)

**ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ВОДЫ НА МЕХАНИЗМ
КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНОСА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Д-р техн. наук С. В. Воронин, канд. техн. наук А. А. Скорик,
ассист. И. Ю. Сафонюк, старш. преп. А. В. Росляков (НАНГУ)

**INFLUENCE OF THE CONCENTRATION OF SMALL-WATER WATER ON THE
MECHANISM OF CORROSIVE-MECHANICAL WEARING OF HYDRAULIC
ENGINEERING OF VEHICLES**

Dr. sc. sciences S. Voronin, phd. tehn. O. Skoryk,
assistant I. Safoniuk, senior lecturer of NANGU O. Rosliakov

Проведено аналіз умов роботи гідравлічного привода транспортних засобів та причин його зносу. Розглянуто механізм взаємодії дрібнодисперсної води в мінеральній оливі із кристалічною поверхнею металу. Запропоновано математичну модель розрахунку міри корозійно-механічного зношування елементів гідравлічного привода, на прикладі пари тертя плунжер-гільза поршневого насоса. Подано результати експериментальних досліджень щодо впливу концентрації води в оливі та напрацювання на знос пари тертя плунжер – гільза.

Ключові слова: *тертя, корозійно-механічний знос, олива, концентрація води, поле поверхні.*

Проведен анализ условий работы гидравлического привода транспортных средств и причин его износа. Рассмотрен механизм взаимодействия мелкодисперсной воды в минеральном масле с кристаллической поверхностью металла. Предложена математическая модель расчета степени коррозионно-механического износа элементов гидравлического привода на примере пары трения плунжер – гильза поршневого насоса. Приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию концентрации воды в масле и наработки на износ пары трения плунжер – гильза.

Ключевые слова: *трение, коррозионно-механический износ, масло, концентрация воды, поле поверхности.*

The use of a hydraulic drive has several advantages over electric drive: relatively less weight, simplicity in operation. However, the operation of hydraulic drives has its own characteristics. An important factor in the operation of the hydraulic drive is the temperature difference at the boundary of the working body and atmospheric air, which leads to the formation of condensed water. Water can get into the hydrosystem and another way. The concentration of water in the hydraulic system of vehicles may reach 1% by volume. Water in oil leads to a number of negative consequences. These include oxidation of the oil and metal surfaces of the hydraulic drive elements, increased emulsibility, increased risk of formation of cavitation zones, increase of oxidative and hydrogen wear of parts of the hydraulic drive.

The influence of water on the wear of parts of the hydraulic drive vehicles always remains an urgent problem. Such wear is called corrosion-mechanical wear. The reason for the corrosion processes is the high activity of metals in comparison with hydrogen. The process of corrosion-mechanical wear is considered in the work and the calculation of wear is presented. The calculation of wear is shown on the example axial-piston pump. The calculation method includes both the basic geometric parameters of the axial-piston pump and the properties of the metallic surfaces. The distance to which the field of the metal surface acts is determined. At the same time, a system of equations was created for the energy of the thermal motion and the energy of the metal surface.

Theoretical calculation results were confirmed by experimental research. The experiment was a study on a stationary friction machine. The friction pair was a shaft and a roller. The main parameters of the experiment were chosen: load, slip speed, slipping path, temperature of the lubricant. The main variable parameter was the concentration of water. The investigated values ranged from 0.0 to 1.0% water. According to the results of the study, wear decreases with acceleration at a uniform growth of water concentration.

Keywords: *friction, corrosion-mechanical wear, oil, water concentration, surface field.*

Вступ. У сучасних умовах виробництва застосування гідропривода набуває все більшого поширення. Гідропривод має ряд переваг перед електроприводом: порівняно менша маса, простота в управлінні. Однак експлуатація гідроприводів має свої особливості. Важливим фактором роботи гідроприводу є перепади температур на межі робочого тіла та атмосферного повітря, що призводить до утворення конденсованої води. Вода може потрапити в гідросистему і іншим шляхом. На прикладі колійної техніки концентрація води в гідравлічній системі транспортних засобів може сягати 1% за об'ємом [1]. Вода в оливі призводить до ряду негативних наслідків. До них можна віднести окислення оливи та металевих поверхонь елементів гідропривода, підвищену емульсованість, підвищення ризику утворення зон кавітації, підвищення окислювального та водневого зносу

деталей гідропривода. Дослідження, подані у [2], показали, що при терті значний вплив на знос чинить вода. Про це свідчать характерні продукти зносу червонуватого кольору на сталевих кульках. Однак кількісного зв'язку впливу води на поверхню в аналітичному вигляді вченими не було встановлено.

Аналіз досліджень та публікацій. Процес зносу пар тертя в агресивному середовищі згідно з [3] умовно можна поділити два взаємно пов'язаних паралельних процеси: механічне зношування та корозійне зношування. Механічна складова зносу добре досліджена вченими [4]. Окремо корозійну складову розглянуто в роботі [15]. Залежності впливу наявності абразивних частинок, впливу шорсткості, в'язкості та мастильної здатності встановлено. Однак корозійна складова зносу є менш дослідженою.

Причиною корозії металевих поверхонь можуть бути кисень, вода, солі, низькомолекулярні кислоти, органічні кислоти і навіть жирні кислоти та ін. Швидкість корозії різного сортаменту металів у різних агресивних середовищах досліджено в праці [5].

Як відомо з [3-4, 6-7], природа взаємодії надмолекулярних структур із металевою поверхнею є електромагнітною. Як показано у [8], краплю води можна розглядати як надмолекулярну структуру, оскільки молекули води є полярними. У зовнішньому електричному полі молекули води впорядковуються, в результаті чого змінюються і деякі властивості краплі [9]. Механізм взаємодії полярних частинок та поверхні металу розглянуто в [10]. Незважаючи на велику кількість робіт, єдиного уявлення щодо корозійно-механічного зношування води не існує, хоча переважна кількість машин працюють в умовах, коли гідравлічна рідина містить воду у певній концентрації.

Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є встановлення

закономірностей впливу концентрації води в гідравлічній оливі на процес розвитку корозійно-механічного зносу деталей гідравлічного привода транспортних засобів.

Для досягнення даної мети необхідно розв'язати такі завдання:

- розробити теоретичну модель корозійно-механічного зносу деталей гідравлічного привода за наявності дрібнодисперсної води в робочій рідині;

- виконати експериментальні дослідження впливу концентрації дрібнодисперсної води на знос трибологічної пари колодка – ролик.

Основна частина. Теоретична модель корозійно-механічного зношування. Визначити міру зношування від корозійного впливу води. Припустимо, що в гідросистемі присутній аксіально-поршневий насос або мотор, поршень із гільзою в якому контактують по циліндричній поверхні (рис. 1). Між поршнем та гільзою існує технологічний зазор Δ , який для справного аксіально-поршневого насоса становить 10-50 мкм.

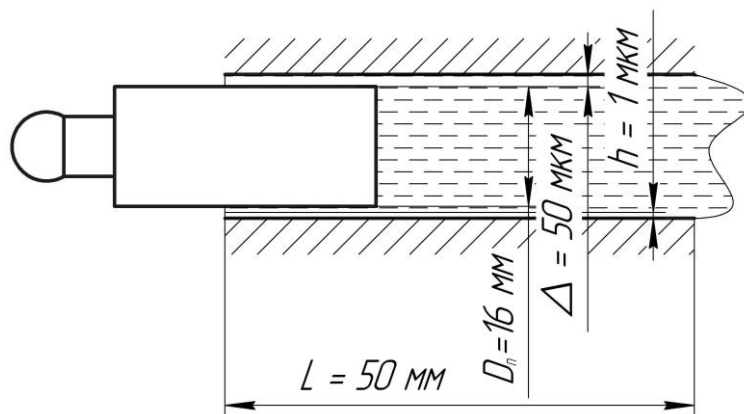


Рис. 1. Схема поршня та гільзи аксіально-поршневого насоса:

L – хід плунжера, мм; h – висота дії поля, мкм; Δ – зазор між плунжером та гільзою, мкм;

D_n – діаметр плунжера, мм

При кожному оберті вала насоса поршень повністю виштовхує робочу рідину і гільза заповнюється новою порцією робочої рідини. Отже, в зазорі між

поршнем та гільзою при кожному оберті вала опиняється нова порція робочої рідини (РР). Тоді витрату РР, що пройшла крізь зазор можна розрахувати за формулою:

$$Q_{\text{вт}} = \frac{V_p}{T_{\text{об}}}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{вт}}$ – витрата оливи через одну пару поршень – гільза, м³/с;

$T_{\text{об}}$ – період обертання вала насоса, с;

V_p – об’єм РР у зазорі пари поршень-гільза, м³;

$$V_p = L \left(\frac{\pi(d_n + \Delta)^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \right). \quad (2)$$

Врахувавши концентрацію води в РР, можна визначити кількість води, що проходить крізь зазор між поршнем та насосом за один оберт:

$$V_p = C \cdot L \left(\frac{\pi(d_n + \Delta)^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \right), \quad (3)$$

де C – концентрація води в оливі, % по об’єму.

Тоді витрата води через зазор між поршнем та гільзою:

$$Q_{\text{вт}} = C \frac{V_p}{T_{\text{об}}}. \quad (4)$$

Механізм взаємодії води та кисню з поверхнею металу має електромагнітну природу. Молекула води є полярним діелектриком, тому вона потрапляє в поле дії кристалічної решітки поверхні металу. Згідно з працями Ахматова О. С. [6] та [7], силове поле поверхні нелінійно ослаблюється і для диполя молекули води діє на відстані до 1 мкм від поверхні металу, Диспергована в оливі вода, у вигляді мікроскопічних крапель, наближаючись до поверхні металу поляризується, утворюючи своє локальне поле, та набуває властивостей електричного диполя [11]. Тобто під впливом поля металевої поверхні крапля води індукує своє поле (рис. 2). Сила, що виникає між ними називається Ван-дер-Ваальсовою силою [12].

Отже, у міру наближення диполя до кристалічної решітки поверхні металу відбувається поляризація диполя і виникає сила притягання, що збільшується у міру наближення.

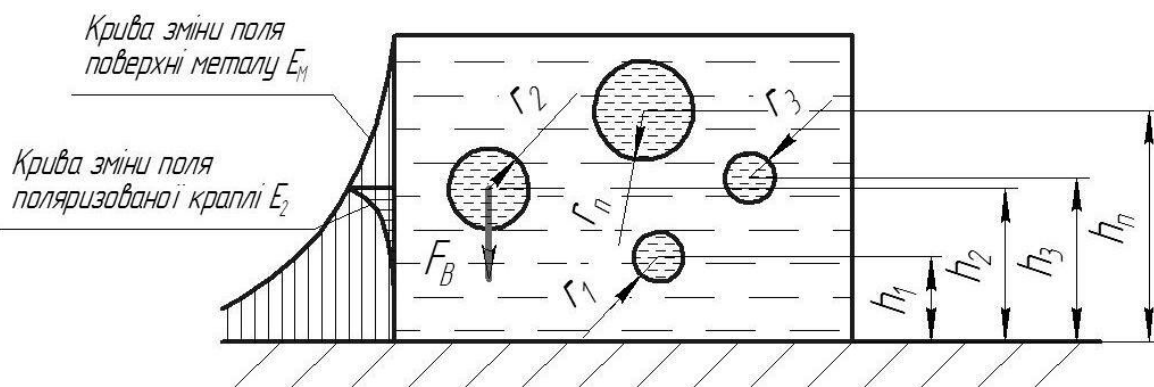


Рис. 2. Схема появи власного електричного поля краплі в наслідок дії поля поверхні металу:

h_1, h_2, h_3, h_n – відстані від крапель до поверхні металу; r_1, r_2, r_3, r_n – радіуси крапель; E_2 – поле конкретної краплі; E_M – поле поверхні металу; F_B – Ван-дер-Ваальсова сила

У загальному уявленні в оливі містяться диполі різної природи: 1 –

штучно додані присадки; 2 – продукти окислення самої оливи; 3 – молекули води

у складі крапель. Їх активність перебуває на рівні одного порядку. Наприклад, дипольний момент олеїнової кислоти становить $4,84 \cdot 10^{-30}$ Кл·м; стеаринової кислоти – $5,80 \cdot 10^{-30}$ Кл·м; а води – $6,152 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Отже, полярна активність молекули води, як наслідок, і її реакція на її електромагнітне поле дещо перевищує класичні полярно активні присадки.

Будучи вільно в об'ємі оливи біля поверхні металу відбувається фізична адсорбція полярних діелектриків. Особливо яскраво це проявляється при оновленні поверхонь тертя (задир, продавлювання граничного шару мастильної плівки, мікрорізання), але це не обов'язкова умова. Конкурентне витіснення молекул присадки молекулами води можливе також за законом теплового руху молекул.

Слід зазначити, що у випадку електричного притягування молекули води до металу процес не закінчується полярним (фізичним) зв'язком. Оскільки переважна більшість металів, які застосовуються у машинобудуванні, є більш активними, ніж водень, то виникає хімічний зв'язок – перехід електронної орбіталі від водню до металу, внаслідок чого утворюється гідроксид, а згодом і оксид металу (новоутворений іонний зв'язок міцніший, ніж зв'язок металу між собою в кристалічній решітці).

Таким чином, поверхня тертя втрачає своє тіло (утворений осад не зв'язаний з поверхнею та змивається новою порцією оливи в насосі). Схема, подана на рис. 3, дає змогу зрозуміти який відсоток води в оливі може доторкнутися до металевої поверхні.

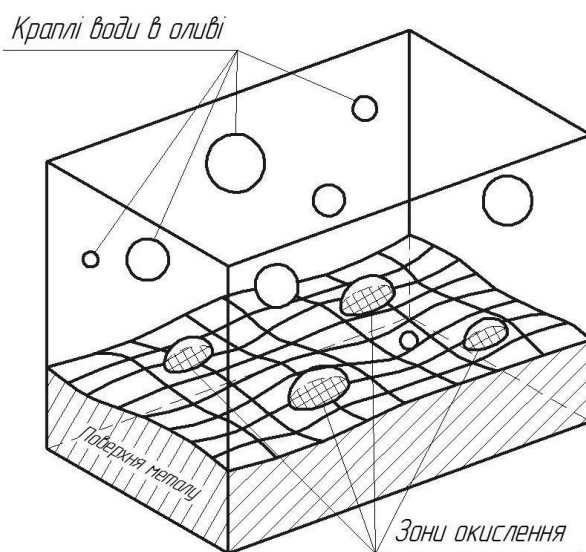


Рис. 3. Схема утворення зон окислення

Звичайно, що в окисленні поверхні металу бере участь не вся вода, яка міститься в зазорі між плунжером та гільзою. Причиною цьому є відносно слабка сила дії поля поверхні металу, тобто поле поверхні діє на деяку величину h у глибину мастильного середовища. Цю величину можна знайти виходячи з

енергетичного балансу. З одного боку, це енергія теплового руху молекул середовища, а з іншого – енергія поля поверхні. На тій відстані, де переважає енергія поля поверхні, буде спрямований рух диполів води до поверхні, а отже, і наступне окислення.

Енергія теплового руху визначається законом Больцмана [9]:

$$W_{TP} = k \cdot T, \quad (5)$$

де k – постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К

T – абсолютна температура, °К.

Отже,

$$W_{TP} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 = 404,34 \cdot 10^{-23} \text{ Дж.}$$

Енергія взаємодії молекули води з полем поверхні металу W_M , залежно від відстані, визначається формулою [8]:

$$W_M = \frac{p_B \cdot q}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot a_0^2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{a_0^2 + h^2}} \right), \quad (6)$$

де p_B – дипольний момент молекули води, Кл·м;

q – заряд іонного вузла, $q = 0,4e = 0,64 \cdot 10^{-19}$ Кл;

ϵ_0 – діелектрична постійна, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

ϵ – відносна діелектрична проникність, для олив $\epsilon = 2,5$;

R – радіус мікроскопічної ділянки, що притягує диполь, $R = 0,1$ мкм;

a_0 – період розміщення ступенів іонного вузла, $a_0 = 5 \cdot 10^{-10}$ м.

Формула визначення енергії взаємодії (6) не має математичного розв'язання. Тому знайдемо розв'язки рівнянь (5) та (6) за допомогою програмного комплексу Mathcad (рис. 4).

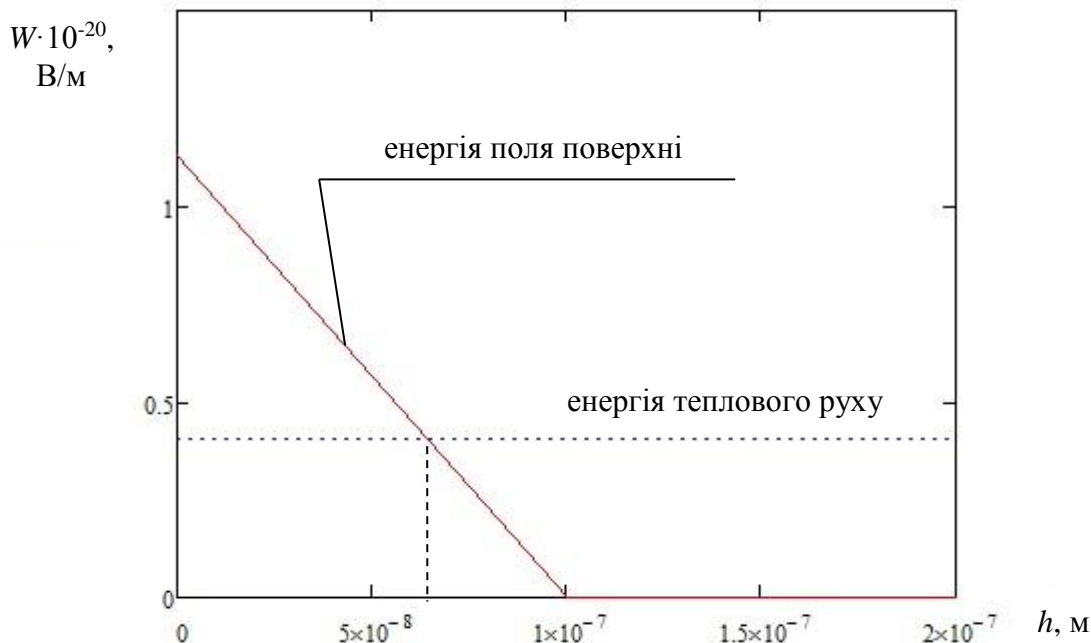


Рис. 4. Відображення енергії поверхні металу та енергії теплового руху

Отже, енергія поверхні металу перевищує енергію теплового руху на відстані близько $7 \cdot 10^{-8}$ м = 0,07 мкм. А отже, краплі та окремі молекули води, що розташовані на відстані менше 0,07 мкм,

будуть притягуватися до поверхні металу (адсорбуватися) та вступати з нею у взаємодію.

Тоді об'єм води, що може взяти участь у реакції, із урахуванням фактичної

площі контакту [13] можна визначити, використавши раніше подану формулу (2).

$$V_B = k \cdot C \cdot L \cdot \left(\frac{\pi(D_n + 2h)^2}{4} - \frac{\pi D_n^2}{4} \right), \quad (7)$$

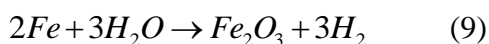
де k – коефіцієнт, що враховує фактичну площу контакту поверхонь тертя, $k = A_\phi / A_H = 0,01 \dots 0,001$ [13], де A_ϕ , A_H – відповідно фактична та номінальна площі контакту.

Врахувавши щільність води, можна визначити масу води, яка може вступити в реакцію:

$$m_B = \rho \cdot k \cdot C \cdot L \cdot \left(\frac{\pi(D_n + 2h)^2}{4} - \frac{\pi D_n^2}{4} \right), \quad (8)$$

де ρ – щільність води, $\rho = 1000$ кг/м³.

За нормальних умов хімічна реакція



є малоімовірною, однак згідно з [3] вона є абсолютно реальною (хоч і відбувається двома етапами) як трибо-хімічна реакція.

Найважливішим моментом в цій реакції є пропорції кількостей речовини. Як

впливає з рівняння (9), на три молекули води припадає два атоми металу (заліза), а результатом є одна молекула оксиду. Отже, можна записати таку рівність:

$$v_{Fe} = \frac{2}{3} v_{H_2O}. \quad (10)$$

де v_{Fe} – кількість металу, моль;

v_{H_2O} – кількість води, моль;

$$v_{H_2O} = \frac{m_B}{M_{H_2O}}, \quad (11)$$

M_{H_2O} – молярна маса молекули води, $M_{H_2O} = 18$ г/моль.

Допускаючи можливість повного реагування води, можна визначити об'єм окисленого металу таким чином:

$$m_{Fe} = v_{Fe} \cdot M_{Fe}, \quad (12)$$

де M_{Fe} – молярна маса заліза, $M_{Fe} = 54$ г/моль.

Остаточна формула визначення окисленого металу матиме вигляд:

$$m_{Fe} = \frac{2 \pi \cdot \rho \cdot k \cdot C \cdot L \cdot h (D_n + h)}{3 M_{H_2O}} \cdot M_{Fe}. \quad (13)$$

Для конкретного випадку проведемо розрахунки вагового зносу m_{Fe} пари плунжер – гільза та відобразимо результати на рис. 5.

Маса окисленого металу m_{Fe} при концентрації води в РР $C = 1\%$ буде становити $3,639 \cdot 10^{-6}$ за один прохід.

Експериментальні дослідження. Згідно з дослідженнями [11] встановлено, що концентрація води в робочій рідині гідроприводів може сягати 1% води. Тому для досліду було прийнято максимальну концентрацію води 1% за об'ємом. За досліджувану робочу рідину було прийнято

мінеральну оливу И-30А ГОСТ 20799. Для пари тертя було прийнято такі матеріали: Сталь 18ХГТ ГОСТ 4543-71 – ролик та БрАЖ9-4 ГОСТ 18175-78 – колодка.

Оскільки лінійні швидкості взаємного переміщення пар тертя в гідравлічному приводі, як правило, незначні, то було прийнято рішення проводити дослідження на мінімально можливих швидкостях для машини тертя СМЦ-2. Частота обертання ролика 300 хв^{-1} , а отже, лінійна швидкість ковзання становила $0,785$ м/с. У свою чергу шлях ковзання за 50 годин становив $141,3$ км.

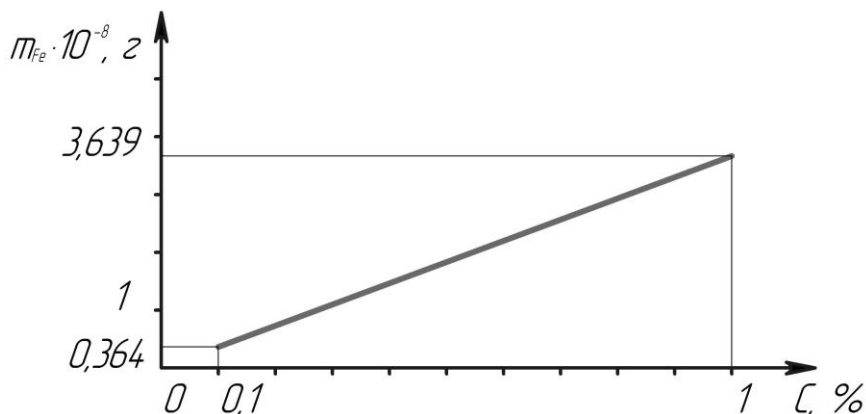


Рис. 5. Ваговий знос плунжера залежно від концентрації води в робочій рідині за один прохід

Навантаження, з яким притискалась колодка до ролика, вибиралось дослідним шляхом. Основною умовою було встановлення максимального навантаження, при якому температура залишається стабіль-

ною. Таке навантаження було прийнято в розмірі 1000 Н, що близько до межі текучості матеріалу колодки для площі 1,7 см².

Результати досліджень зведені до таблиці.

Таблиця

Знос колодки та ролика залежно від напрацювання

Номер досліджу	Час проведення досліджу, год	Ваговий знос колодки, г	Ваговий знос ролика, г
1. Знос колодки та ролика при використанні чистого И-30А (без впливу води)	10	0,00265	0,00260
	20	0,00460	0,00415
	30	0,00655	0,00550
	40	0,00850	0,00725
	50	0,00955	0,00855
2. Знос колодки та ролика при застосуванні И-30А із вмістом води 0,5 %	50	0,01240	0,01115
3. Знос колодки та ролика при застосуванні И-30А із вмістом води 1 %	50	0,01910	0,01710

Проведені дослідження показали, що збільшення концентрації води в мастильному матеріалі до 1 % призводить до збільшення зносу майже у два рази. Зобразимо отриману характеристику графічно (рис. 6).

Важливо зазначити, що характер зміни швидкості зносу в межах до 1% води

має нелінійний характер. Тобто у міру збільшення концентрації води в оливі швидкість зносу зростає із прискоренням.

Теоретична лінія зносу нанесена із урахуванням різниці площ контакту аксіально-поршневого насоса та моделі колодка – ролик, а також кількості циклів (обертів).

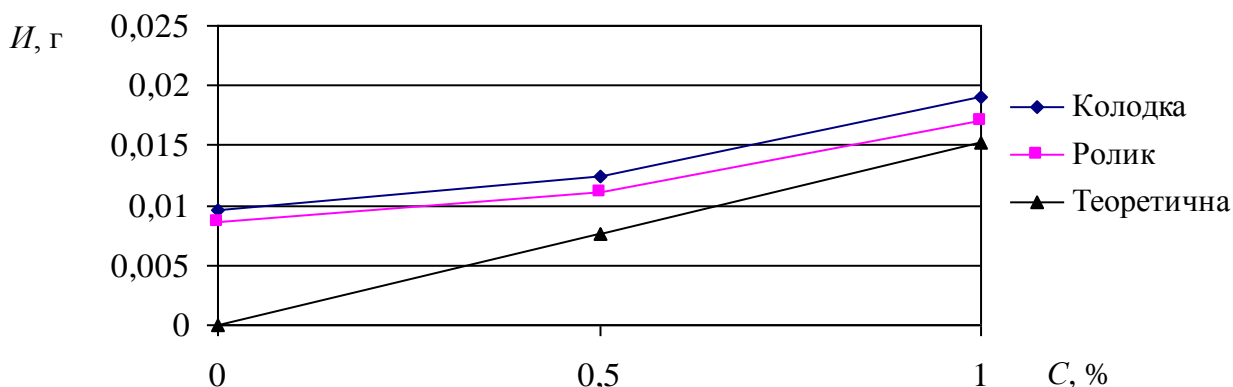


Рис. 6. Знос пари тертя за наявності води

Висновки. Розроблено теоретичну модель корозійно-механічного зношування, яка враховує концентрацію молекул води в оливі та підтверджує негативний вплив води на зношування агрегатів гідравлічних приводів засобів транспорту. В теоретичній моделі знос залежить від концентрації води прямо пропорційно.

Експериментальні дослідження підтверджують теоретичні дослідження.

Знос зростає зі збільшенням концентрації води, однак в експерименті спостерігається нелінійність. Цей факт може бути пояснений механічним зношуванням без наявності води в оливі та наявністю великої кількості абразивних продуктів зносу – окислів. Розбіжність значень теоретичної та експериментальної кривої при концентрації 1 % становить 20 %.

Список використаних джерел

1. Аналіз властивостей робочих рідин гідроприводів колійної техніки залізниць України [Текст] / С. В. Воронін, І. Ю. Сафонюк, Д. В. Онопрейчук [та ін.] // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 165. – С. 90–98.
2. Сафонюк, І. Ю. Вплив вмісту води у гідравлічній оливі на знос деталей тертя засобів транспорту [Текст] / І. Ю. Сафонюк // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 159. – С. 103–108.
3. Хайнике, Г. Трибохимия [Текст] / Г. Хайнике. – М. : Мир 1987. – 584 с.
4. Крагельский, И. В. Трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
5. Огородников, С. В. Справочник нефтехимика [Текст] / под ред. С. К. Огородникова. – Л. : Химия, 1978. – Т. 1. – 496 с.
6. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А. С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 471 с.
7. Лысиков Е. Н. Надмолекулярные структуры жидких смазочных сред и их влияние на знос технических систем [Текст] / Е. Н. Лысиков, В. Б. Косолапов, С. В. Воронин. – Харьков : ЭДЭНА, 2009. – 273 с.

8. Voronin, S. The influence of external field on the lubricity of mineral oil for railway transport [Text] / Serhii Voronin, Pavlo Konovalov, Ivan Safoniuk, Oleksandr Kebko / MATEC Web of Conferences 2017, Vol. 116, 6 p.

9. Воронін, С. В. Вплив частоти коливань електричного поля на процес коалесценції води в робочій рідині [Текст] / С. В. Воронін, І. Ю. Сафонюк, А. В. Олійник // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 142. – С. 169–173.

10. Voronin, S.V. Effects of electric and magnetic fields on the behavior of oil additives [Text] / S.V. Voronin, A.V. Dunaev / Friction and wear 2015, Vol. 36, No. 1, pp. 41–49.

11. Руднев, В. К. Эксплуатационные материалы для строительных и дорожных машин [Текст] / В. К. Руднев, Е. С. Венцель, Е. Н. Лысиков. – К., 1993. – 238 с.

12. Киреев, В. А. Курс физической химии [Текст] / В. А. Киреев. – М. : ГОСХИМИЗДАТ, 1955. – 832 с.

13. Чичинадзе А. В. Основы трибологии [Текст] / А. В. Чичинадзе – М. : Машиностроение, 2001. – 664 с.

14. Yanliang Huang. Pure mechanical wear loss measurement in corrosive wear [Text] / Yanliang Huang, Xiaoxia Jiang, Sizuo Li / Bulletin of Materials Science, January 2000, Vol. 23, Issue 6. – P. 539–542.

Воронін Сергій Володимирович, д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри будівельних, колійних і вантажно-розвантажувальних машин Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел. (057) 730-10-66; (095) 500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Скорик Олексій Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +380 (057) 730-10-10. E-mail: dek_srt@ukr.net.

Сафонюк Іван Юрійович, асистент кафедри будівельних, колійних і вантажно-розвантажувальних машин

Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (096) 851-31-37. E-mail: jonisaf@meta.ua.

Росляков Олексій Васильович, старш. викл. кафедри управління повсякденною діяльністю командно-штабного факультету Національної академії Національної гвардії України. Тел.: (057) 739-26-79.

E-mail: metodistfak1@ukr.net.

Воронин Сергей Владимирович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой строительных, путевых и погрузочно-разгрузочных машин Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Тел. (057) 730-10-66; (095) 500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Скорик Алексей Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: +380 (057) 730-10-10.

E-mail: dek_srt@ukr.net.

Сафонюк Иван Юрьевич, ассистент кафедры строительных, путевых и погрузочно-разгрузочных машин Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (096) 851-31-37.

E-mail: jonisaf@meta.ua.

Росляков Алексей Васильевич, старш. преп. кафедры управления повседневной деятельностью командно-штабного факультета Национальной академии Национальной гвардии Украины. Тел. (057) 739-26-79.

E-mail: metodistfak1@ukr.net.

Sergey Voronin, Doctor of Sciences in Technology, Associate Professor, Head of Department «Construction, track and handling machines», Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-66; (095) 500-81-59.

E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Skoryk Oleksii, Candidate of Technical Sciences, associate professor Department of Track and track facilities Ukrainian State University of Railway Transport Tel.: +380 (057) 730-10-10. E-mail: dek_srt@ukr.net.

Ivan Saphonyuk, assistant, Department of «Construction, track and handling machines», Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (096) 851-31-37. E-mail: jonisaf@meta.ua.

Oleksii Rosliakov, Senior Lecturer at the Department of Management of the day-to-day activities of the Command-Staff Faculty of the National Academy of the National Guard of Ukraine. Tel. (057) 739-26-79.

E-mail: metodistfak1@ukr.net.

Статтю прийнято 7.06.2018 р.

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

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

Випуск 178

«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 Буранова Н. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 29.05.2018 р.

Формат паперу А4. Папір писальний.

Умовн. друк. арк. 13,0. Тираж 105. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018р.