



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 174

Харків 2017

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 № 8 від 21 грудня 2017 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 – Михалків Сергій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Бабаєв М. М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Бойнік А. Б., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Бутько Т. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Ватуля Г. Л., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ
Вовк Р. В., д.фіз.-мат.н., професор, УкрДУЗТ
Воронін С. В., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ
Ворожбіян М. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Даренський О. М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Каграманян А. О., к.т.н., доцент, УкрДУЗТ
Лаврухін О. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

Ломотько Д. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Мартинов І. Е., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Мойсеєнко В. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Мороз В. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Огар О. М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Приходько С. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Плугін А. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Пузир В. Г., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Тимофєєва Л. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ
Фалендиш А. П., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

ISSN 1994-7852

Зареєстровано 2 червня 2007 р.
у ISSN International Centre 20, Rue
Bachaumont, 75002 PAPIIS, FRANCE

© Український державний університет
залізничного транспорту, 2017

ЗМІСТ

<i>Мартинів І. Е., Кладько Н. С.</i> До питання оцінки ефективності вдосконалення буксових вузлів вантажних вагонів	4
<i>Ольховська Т. О.</i> Визначення характеристик запасів запасних частин для забезпечення утримання тепловозів	10
<i>Тарадай А. М., Гвоздецький А. В., Фомич С. В.</i> Выбор базисного периода для статистического моделирования неравномерности водопотребления	18
<i>Бойко О. В., Стоянов В. В., Бояджі А. О., Коршак О. М., Чучмай С. М.</i> Проектування дерев'яних полігональних склепінчастих покриттів	27
<i>Стороженко Л. І., Єрмоленко Д. А., Гасій Г. М.</i> Розрахунок напружено-деформованого стану структурно-вантової конструкції	33
<i>Буцький О. В.</i> Застосування синтетичних матеріалів як фільтрувальних в оливних фільтрах тепловозних дизелів	42
<i>Білошицький Е. В., Мямлін С. С.</i> Шляхи вдосконалення систем водяного опалення пасажирських вагонів	50
<i>Гончаренко Д. Ф., Чибаров Д. В.</i> Ремонт и восстановление фасадов исторических зданий города Харькова	60
<i>Мозговий А. О.</i> Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів дніпровського каскаду	70
<i>Шинкевич Е. С., Линник Д. С.</i> Многокритериальная оптимизация состава арболитобетона	81
<i>Ремарчук М. П., Белорусов О. І., Тертичний В. В.</i> Удосканалення методики контролю температури рейок та рейкових плітей безстикової колії	89
<i>Крашенінін О. С., Яковлев С. С.</i> Оцінка конкурентоспроможності швидкісного рухомого складу українського виробництва	96
<i>Мойсеєнко В. І., Котов М. О.</i> Проблеми обліку паливно-енергетичних ресурсів у локомотивному господарстві	104
<i>Тимофєєв С. С., Огульчанська Н. Р.</i> Аналіз стану рейок у процесі експлуатації	110
<i>Панченко С. В., Даренський О. М., Лобяк О. В.</i> Застосування методу скінченних елементів для визначення напружено-деформованого стану елементів залізничної колії	117
<i>Мартинів І. Е., Бугаєць Н. В., Клименко А. В.</i> Моделювання взаємодії колії та рухомого складу при дискретній підрейковій основі в зоні рейкових стиків	127

УДК 629.4.027

**ДО ПИТАННЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВДОСКОНАЛЕННЯ БУКСОВИХ ВУЗЛІВ
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ**

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, асп. Н. С. Кладько

**К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ БУКСОВЫХ
УЗЛОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**

Д-р техн. наук И. Э. Мартынов, асп. Н. С. Кладько

TO THE QUESTION ON IMPROVEMENT IN FREIGHT CAR AXLE-BOX

Doct.of techn. sciences I. E. Martynov, postgraduate N. S. Kladko

У статті виконано порівняння вартості експлуатаційних витрат до моменту проведення ремонту буксового вузла вантажного вагона. Установлено економічний ефект від заміни вітчизняного типового буксового вузла з циліндричними підшипниками на буксовий вузол з конічними підшипниками. Головну увагу приділено методиці визначення витрат під час експлуатації різних типів буксових вузлів. Основною метою проведеного дослідження є прогноз доцільності інноваційного проекту та виділення основоположних показників, які в подальшому забезпечать оперативність у виборі якісного та конкурентоспроможного продукту.

Ключові слова: підшипник, букса, надійність, довговічність, вартість, витрати, експлуатація, цикл, ревізія.

В статье выполнено сравнение стоимости эксплуатационных затрат к моменту проведения ремонта буксового узла грузового вагона. Установлено экономический эффект от замены буксового узла с цилиндрическими роликовыми подшипниками на буксовый узел с коническими подшипниками кассетного типа. Основное внимание отведено методике определения затрат во время эксплуатации разных типов буксовых узлов. Основной целью проведенного исследования является прогнозирование целесообразности инновационного проекта и выделение основных показателей, которые в дальнейшем обеспечат оперативность в выборе качественного и конкурентоспособного продукта.

Ключевые слова: подшипник, букса, надёжность, долговечность, стоимость, затраты, эксплуатация, цикл, ревизия.

The article contains a comparison of operating costs to the time of repair of the axle unit of the freight car. The economic effect of replacing the domestic standard axle box unit with cylindrical bearings with a pedestal unit with tapered bearings is established. The main attention is given to the methodology of determining of the operating costs for the different types of axle boxes. The main objective of the study is to predict the feasibility of an innovative project and to identify the key indicators that will guarantee the efficiency and competitiveness of a product. The issues of evaluation and analysis of investment efficiency are extremely relevant from the point of view of both theoretical studies and applied aspects of investment policy. These issues are constantly at the center of active research and development. The article analyzes the concept of the life cycle. The possibility of using the concept in terms of calculating costs for the operation of different types of

axle boxes is considered. A comparative analysis of the practical application of the concept of the life cycle of axle boxes with conical and cylindrical bearings is presented.

Keywords: bearing, axle-box, reliability, durability, price, costs, operation, cycle, revision.

Вступ. Україна має одну з найбільш розвинених у Європі мережу залізниць, експлуатаційна довжина якої становить понад 22 тис. км. За густиною вона посідає провідне місце серед країн СНД і наближається за цим показником до європейських країн: Франції та Італії.

Найважливішими перевагами залізничного транспорту в сучасних умовах є його економічність, доступність та екологічність. Але останніми роками особливо загострилися проблеми оновлення матеріально-технічної бази залізничного транспорту, насамперед вагонного господарства. Так, парк вантажних вагонів ПАТ "Укрзалізниця" невпинно старіє, строк служби значної частини вагонів неодноразово подовжувався. Нових вагонів, які були нещодавно побудовані, недостатньо і вони почали надходити до експлуатаційного парку лише наприкінці 2016 року. Унаслідок цього середній строк служби універсальних напіввагонів, які використовуються найбільш інтенсивно, становить 24 роки і перевищив нормативний строк служби у 22 роки.

Хронічний брак фінансування галузі не дає змоги повністю відновлювати працездатність рухомого складу. До того ж технічні рішення щодо конструктивних особливостей вантажних вагонів здебільшого були прийняті ще у другій половині ХХ сторіччя. Такі вагони мають незадовільні техніко-економічні параметри, недостатній рівень надійності та за своїми споживчими якостями не задовольняють зростаючих потреб вантажовласників. Вартість життєвого циклу такого вагона виявляється набагато вищою від вартості наявних зарубіжних аналогів.

Поповнення вагонного парку повинно виконуватися вагонами нового покоління, що насамперед вимагає застосування ходових частин з буксовими вузлами

підвищеної надійності. Використання сучасних підшипників касетного типу дасть змогу збільшити міжремонтні пробіги вагонів та виконувати їх без проведення проміжних ревізій. Завдяки цьому зменшуються витрати на утримання вагонів та підвищується швидкість постачання вантажів до місця призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концепція життєвого циклу виникла наприкінці ХІХ сторіччя і спочатку застосовувалася лише у соціальних науках для визначення спадковості й розвитку на рівні індивідуумів та організмів [1].

Одна з перших праць у галузі життєвого циклу продукту належить Т. Левітту [2].

Сьогодні життєвий цикл виробу (Product Life Cycle Cost – LCC) є однією з найбільш відомих та досліджених галузей застосування концепції життєвого циклу. Ця тема розглядається вченими та практиками протягом тривалого періоду [3, 4].

У галузі світового залізничного транспорту показник вартості життєвого циклу виробу широко розповсюдився лише на початку 1990-х років [5, 6].

Розрахунок LCC наочно показує співвідношення витрат на придбання виробу й так званих «післяпродажних» витрат. Варто зазначити, що саме на післяпродажні витрати припадає в середньому 60-80 % вартості життєвого циклу виробу [7].

Модель життєвого циклу будь-якого виробу можна розкласти на декілька стадій, а саме: аналіз та розроблення технології, виробниче розроблення, виробництво та розгортання, фінансування та підтримка [8].

На сьогодні показник LCC на залізницях України не набув широкого розповсюдження і використовується як додаткове значення [9-11].

Як головний критерій вибору того чи іншого виробу заведено враховувати лише його вихідну вартість. В умовах сучасних ринкових відносин виробник повинен забезпечувати не лише технологічність, а й економічну доцільність, яка формує адекватну ціну на цей виріб та вимагає найкоротших строків окупності.

Хоча при виконанні розрахунків ЛСС виникає низка проблем, які пов'язані з браком чітко встановлених стандартів та методики розрахунку життєвого циклу, але ЛСС залишається найбільш об'єктивним механізмом для визначення строків окупності та формування післяпродажної ціни виробу. Саме сумарні витрати ЛСС мають вагоме й визначальне значення, оскільки може трапитися, що дешевший на момент купівлі виріб у процесі експлуатації потребуватиме більших витрат.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цієї роботи є оцінка ефективності удосконалення конструкції буксових вузлів вантажних вагонів з циліндричними підшипниками завдяки використанню підшипників підвищеної надійності.

Для досягнення визначеної мети розв'язувалися такі завдання:

- встановлення особливостей впливу параметрів сучасних підшипникових вузлів вагонів на динамічні властивості та довговічність конструкції;

- обрання моделі розрахунку експлуатаційних витрат, яка дасть змогу найбільш точно відобразити всі витрати на життєвий цикл підшипникового вузла;

- оцінка економічного ефекту від застосування підшипникових вузлів зі зміненою схемою передачі навантажень.

Основна частина дослідження. Буксові вузли є елементом ходових частин вагонів. Вони забезпечують передачу всіх видів навантажень від кузова вагона до шийки осі та одночасно є ємністю для розміщення мастила. Буксові вузли з'єднують колісні пари з рамою візка, оберігають шийку від забруднень та

пошкоджень і запобігають зміщенню колісних пар відносно візка.

Буксові вузли з підшипниками кочення поділяються на вузли з циліндричними, сферичними та конічними підшипниками. Перспективними вважаються конструкції із застосуванням конічних підшипників. Їх успішно використовують на залізницях різних країн світу. Головна перевага таких букс полягає у збільшеному міжремонтному пробігу (до 800 тис. км) завдяки підвищеній надійності всіх елементів підшипникового вузла [12].

До того ж перевагами конічних підшипникових вузлів можна вважати зменшення матеріальних витрат та полегшення процесів проведення монтажно-демонтажних робіт і технічного обслуговування [13].

На вітчизняних вагонах касетні буксові вузли встановлюють на візках нового покоління для швидкостей руху до 200 км/год.

Касетний буксовий вузол є готовою до встановлення конструкцією, відрегульованою та заправленою мастилом на заводі-виготовлювачі. Він має менші розміри та масу, ніж типовий вузол, а також потребує удвічі меншої кількості мастила. Буксовий вузол складається з дворядного підшипника, що має два ряди внутрішніх кілець, два комплекти конічних роликів, два сепаратори та єдине зовнішнє кільце, що відіграє роль корпусу букси. Висока технологічність конструкції касетного підшипникового вузла значною мірою впливає на складність у виготовленні та складанні конструкції, отже, і на її собівартість.

Оцінити економічну доцільність упровадження буксового вузла з конічними підшипниками можна використавши формулу для визначення вартості життєвого циклу. До вартості життєвого циклу рухомого складу, а також окремих вузлів та комплектуючих включають усі одноразові (капітальні) та поточні (експлуатаційні) витрати [10].

$$LCC_T = K_t^{\text{придб}} + \sum_{t_H}^{t_H+T} (K_t^{\text{об}} + I_t \pm L_t) \cdot a_t, \quad (1)$$

де $K_t^{\text{придб}}$ – вартість придбання буксового вузла, грн;

$K_t^{\text{об}}$ – капітальні (одноразові) вкладення у році t життєвого циклу, грн;

I_t – поточні витрати у році t життєвого циклу, грн;

L_t – залишкова вартість основних фондів, що вибувають у році t життєвого циклу, грн;

T – тривалість життєвого циклу, р.;

t_H – початковий рік життєвого циклу буксового вузла;

a_t – коефіцієнт дисконтування.

Коефіцієнт дисконтування a_t розраховується за формулою

$$a_t = (1 + E_d)^{t_p - 1}, \quad (2)$$

де E_d – норма дисконту;

t_p – розрахунковий рік життєвого циклу;

t – рік життєвого циклу, витрати якого приводяться до розрахункового року.

Довговічність типового буксового вузла з циліндричними підшипниками в середньому становить приблизно 4,5 років [14]. Фактично ж уже після проведення повної ревізії ми маємо буксові вузли з повністю інакшими, ніж у початкових, показниками надійності. Протягом припрацювання таких буксових вузлів з'являється вірогідність нагрівання та виходу з ладу підшипників [15]. Цей факт варто враховувати при розрахунках показника LCC.

Можливим варіантом визначення вартості LCC для буксових вузлів з циліндричними підшипниками є розрахунок витрат за період до виконання

ремонту, тобто до проведення повної ревізії буксових вузлів.

На основі методики розрахунку показника LCC [10] до складу одноразових витрат входять капітальні вкладення, які необхідно виконати при упровадженні буксових вузлів в експлуатацію.

При розрахунку капітальних вкладень урахувалися всі витрати, що стосуються вартості складання буксових вузлів, а саме:

- вартість монтажу підшипників;

- вартість комплектуючих для складання буксового вузла, без урахування самого підшипника (корпус, оглядова кришка, кріпильна кришка, стопорна планка, мастило, адаптер та ін.);

- підшипники.

Наступною складовою життєвого циклу є експлуатаційні витрати. Експлуатаційними витратами слід вважати витрати на проведення повних та проміжних ревізій. Тут варто звернути увагу на той факт, що для типових буксових вузлів з циліндричними підшипниками раз на рік виконується проміжна ревізія і кожні два роки повна. Для буксових вузлів з конічними підшипниками характерний брак проміжних ревізій, а також збільшений період для проведення повної ревізії.

Головною метою проведення розрахунку є встановлення доцільності упровадження конічних підшипникових вузлів на вітчизняних вантажних вагонах. При цьому бажаний економічний ефект має з'явитися завдяки зниженню витрат на проведення ревізій підшипникових вузлів; зменшення кількості колісних пар, що потребують заміни за весь строк служби вагона; зниження кількості відчеплень вагонів при виникненні надмірного нагріву підшипникового вузла.

Протягом розрахунку вартості ревізій циліндричних підшипникових вузлів були враховані витрати на заміну запасних частин при проведенні ремонту, відрахування на соціальні заходи та

витрати на зарплату робітникам. Основні статті витрат на комплектуючі для різних типів підшипникових вузлів, а також на виконання монтажно-демонтажних робіт наведено в таблиці.

Таблиця

Розрахунок вартості формування підшипникових вузлів

Стаття витрат	Вартість підшипника, тис. грн	
	конічного	циліндричного
Монтаж підшипників	3,81	1,81
Комплектуючі для формування буксового вузла (без підшипника)	6,44	2,36
Корпус букси з лабіринтом	-	1,75
Кришка оглядова	-	0,05
Кріпильна кришка	0,51	0,51
Ущільнювальне кільце кріпильної кришки	-	0,01
Прокладка оглядової кришки	-	0,004
Планка стопорна	-	0,035
Мастило для лабіринту	0,001	0,001
Адаптер	1,08	-
Корпус букси	-	1,08
Підшипник	6,15	1,5
Повна вартість нового буксового вузла з урахуванням монтажу	18,0	6,75

Розрахунками було встановлено, що економія коштів при заміні циліндричних буксових вузлів на касетні з установленням їх у адаптер зі змінним навантаженням, на 100 тис. км пробігу на один буксовий вузол становитиме 1,5 тис. грн.

У розрахунках не враховується зниження трудомісткості при виконанні монтажних робіт при складанні буксових вузлів (використана вартість монтажу звичайних циліндричних підшипників). У разі розрахунку за умови зниження вартості монтажу буксових вузлів з конічними підшипниками ефект від застосування буде вищим. Для конічних касетних підшипників не враховано витрати на переобладнання депо.

Виконаний розрахунок – спрощений і отриману оцінку не варто сприймати як реальний вартісний орієнтир. А втім наведений розрахунок указує на можливість значної економії коштів при застосуванні конічних підшипникових вузлів та доводить ефективність від удосконалення типових буксових вузлів.

Висновки. Застосування нового буксового вузла дасть змогу здійснювати його заміну не раніше ніж через 10 років. Очевидно, що заміна типових буксових вузлів вузлами, оснащеними адаптерами, має значно знизити експлуатаційні витрати завдяки подовженню строку міжремонтних циклів буксових вузлів.

Список використаних джерел

1. Широкова, Г. В. Концепция жизненного цикла в современных организационных и управленческих исследованиях [Текст] / Г. В. Широкова, Т. Н. Клемина, Т. П. Козырева // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2007. – Вып. 2. – С. 3–31.
2. Levitt, T. Exploit the Product Life Cycle [Text] / T. Levitt // Harvard Business Review. 1965. – Vol. 43. – November-December № 6. – P. 81–94.
3. Mason, R. S. Product Maturity and Marketing Strategy [Text] / R. S. Mason // European Journal of Marketing. – 2001. – Vol. 10, №1. – P. 36–47.
4. Selecting Test and Maintenance Strategies to achieve Availability Target with lowest Life-Cycle Cost, P. Dersin, A. Peronne, C. Arroum (ALSTOM transport), RAMS 2008, Las Vegas, NE, USA.
5. Тиматков, В. В. Особенности расчёта стоимости жизненного цикла железнодорожной техники при рассмотрении её отдельных узлов [Текст] / В. В. Тиматков // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 2(27). – С. 54–55.
6. Понтиселли, К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава: от теории к практике [Текст] / К. Понтиселли // Техника железных дорог. – М., 2009. – № 4(8). – С. 19–24.
7. Павлов, Л. Н. Использование и оптимизация показателя стоимости жизненного цикла изделия [Текст] / Л. Н. Павлов // Железнодорожный транспорт. – М., 2007. – № 7. – С. 74–77.
8. Kossiakoff A., Sweet W. N., Seymour S. J., Biemer S. M. Systems Engineering Principles and Practice [Text]. – 2-е изд. – Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons, 2011. – 599 с.
9. Иванова, Н. Г. Оценка затрат жизненного цикла при оценке эффективности новых локомотивов [Текст] / Н. Г. Иванова // Бюллетень транспортной информации: информ.-практ. журнал. – М., 2007. – № 1. – С. 21–25.
10. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог [Текст] : научн. издание / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин, А. П. Фалендыш. – Л.: Ноулидж, 2011. – 173 с.
11. Павлов, Л. Н. Оценка стоимости жизненного цикла железнодорожной техники [Текст] / Л. Н. Павлов, Ю. И. Соколов, Н. Е. Вавилов // Экономика железных дорог. – 2006. – № 11. – С. 15–19.
12. Труфанова, А. В. Аналіз перспективних конструкцій буксових вузлів вагонів / А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, С. О. Міроненко // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 147. – С. 50–53.
13. К вопросу внедрения вагонных букс с коническими роликоподшипниками [Текст] / А. Д. Лашко, В. В. Мархай, И. Э. Мартынов [та ін.] // Залізничний транспорт України. – 2006. – №2. – С. 17-19.
14. Мартинов, І. Е. Розвиток методів розрахунку та випробувань буксових підшипникових вузлів вантажних вагонів з урахуванням особливостей їх експлуатації [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Мартинов Ігор Ернстович. – Харків, 2009. – 431 с.
15. Ковалёв, Е. А. Эксплуатационная долговечность подшипников букс вагонов и локомотивов [Текст] / Е. А. Ковалёв, В. И. Квасов // Труды Ростовского института инженеров железнодорожного транспорта. – 1982. – Вып. 167. – С. 8–13.

Мартинов Ігор Ернстович, д-р техн. наук, професор кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-35. E-mail:martinov.hiit@gmail.com.

Кладько Надія Сергіївна, аспірант Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail:kladkonadiia@gmail.com.

Martinov Igor E. d-r science, professor of wagons of the Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Kladko Nadiia S. postgraduate student of the Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail:kladkonadiia@gmail.com.

Стаття прийнята 04.12.2017 р.

УДК 658.7.011.1

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПАСІВ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УТРИМАННЯ ТЕПЛОВОЗІВ

Инж. Т. О. Ольховська (РФ «Південна залізниця»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПАСОВ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ТЕПЛОВОЗОВ

Инж. Т. А. Ольховская (РФ «Южная железная дорога»)

DEFINITION OF CHARACTERISTICS OF STOCKS OF SPARE PARTS FOR MAINTENANCE OF THE MAINTENANCE OF DIESEL LOCOMOTIVES

Eng. T. O. Olxovska (RF Southern Railway)

У статті розглянуті питання формування запасів запасних частин для обслуговування тепловозів, які дозволяють якісно оцінювати їх рівень з погляду теорії масового обслуговування. На основі отриманих даних запропонований метод розрахунку для визначення раціонального кількісного розміру запасних частин, які можна відремонтувати, й таких, які можна тільки утилізувати. Створено номограми залежностей, які враховують імовірність відмов і час поповнення деталей, що вийшли з ладу, які практично дають можливість обслуговуючому персоналу оперативно визначати потрібну кількість запасних частин того або іншого типу й формувати на цій основі їх відповідний запас.

Ключові слова: деталі, запас, відмова, потік, система, тепловоз, елемент.

В статье рассмотрены вопросы формирования запасов запасных частей для обслуживания тепловозов, которые позволяют качественно оценивать их уровень с точки зрения теории массового обслуживания. На основе полученных данных предложен метод расчета для определения рационального количественного размера запасных частей, которые можно отремонтировать, и таких, которые можно только утилизировать. Созданы номограммы зависимостей, которые учитывают вероятность отказов и время пополнения вышедших из строя деталей, которые практически дают возможность обслуживающему персоналу оперативно определять нужное количество запасных частей того или другого типа и формировать на этой основе их соответствующий запас.

Ключевые слова: детали, запас, отказ, поток, система, тепловоз, элемент.

In clause questions of formation of stocks of spare parts for service of diesel locomotives which allow estimating qualitatively their level from the point of view of the theory of mass service are considered. On the basis of the lead researches it is certain, that the basic condition of stable logistics at service of locomotives is formation and the control of stocks of corresponding kinds of details over all kinds of storage (shops, platforms, pantries). Thus it was considered, that such supply has mass character. The method which allows on the basis of statistical characteristics and parameters of reliability, during operation of the locomotive is offered, to estimate the charge of limiting spare parts. On the basis of the received data the procedure of payments for definition of the rational quantitative size of spare parts which can be repaired and such which can be utilized only is offered. Are created schedule dependence's which consider probability of refusals and time of updating of the failed details which practically enable the attendants imperatively to define the

necessary quantity of spare parts of this or that type and to form on this basis their corresponding stock.

Keywords: *details, a stock, refusal, a stream, system, a diesel locomotive, an element.*

Вступ. Запаси мають складну статико-динамічну природу. Статичність їх проявляється в тому, що на момент часу, який визначається, конкретний продукт не витрачається й не переміщується. Динамічність запасів витікає з того, що на складі, де здебільшого вони зберігаються, ситуація постійно змінюється: тобто одні продукти відпускаються, а інші надходять. Взагалі ефективність логістичних систем підвищилася б при відсутності запасів, у створення та утримання яких вкладаються чималі кошти. Однак на практиці обійтися без запасів зовсім неможливо. Запаси запасних частин і матеріалів є дуже важливим матеріальним ресурсом, без якого неможлива робота ремонтного виробництва. Існує багато моделей поповнення запасів, підходи до яких можуть значно відрізнятися між собою. Істотно це залежить у першу чергу від виду запасних частин за характером їх подальшого використання. Одні запасні частини після їх відмови можуть бути відновлені (відремонтовані) і у подальшому встановлені на локомотив, а інші після виходу їх з ладу можна тільки утилізувати. Виходячи із цього формалізація задачі з управління запасами за видами запасних частин є актуальною й своєчасною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування теорії управління запасами як наукової дисципліни розпочалося в середині 1950-х років. Докладний розвиток цього етапу наведений у роботах [1, 2, 3]. Є ряд навчальних посібників [4, 5, 6, 7, 9, 10, 13], де з математичної точки зору розкривається сутність формування обсягу запасів, а також основні закономірності стосовно до різних галузей промисловості. Так, у роботі [10] автори роблять аналіз виробничих запасів виходячи з розгляду їх як важливого елемента, що розподіляється за

трьома напрямками: аналіз виробничих ресурсів, аналіз витрат на виробництво та аналіз ефективності використання запасів. У багатьох дослідженнях (як вітчизняних, так і закордонних) в процесі аналізу запасів [4, 17, 20] пропонується застосовувати показники моделі економічно обгрунтованого розміру замовлення, яка відома як модель Уілсона, або модель EOQ (Economic Order Quantity model). Підкреслюється, що вона дає змогу оцінити оптимальний розмір запасів та їх вплив на кінцеві результати діяльності підприємства. Висновок формули Уілсона [3] ґрунтується на необхідності мінімізації витрат на закупівлю продуктів і їх утримання на складі у класичному математичному аналізі. При цьому останнім часом з'явилася безліч модифікацій цієї моделі за рахунок включення додаткових факторів. Таке ускладнення утруднило її практичне застосування, оскільки для розрахунків не завжди вистачає необхідної інформації. Автори [4, 11, 12, 18, 19] у своїх дослідженнях відмічають, що більшість існуючих розробок має обмежену застосовність через неконкретність у визначенні обсягу в результаті втрати переваг, вольового призначення норм запасів, а також (що найголовніше) відсутності комплексного підходу до складових частин сукупних запасів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даного дослідження є створення методу розрахунку запасів запасних частин для організації ТО і ремонту тепловозів. Для досягнення цього вирішені такі завдання:

- створення аналітичних залежностей, за якими можна здійснювати розрахунок запасів різних видів запасних частин щодо їх подальшого використання;
- розробка графічних залежностей, на підставі яких (без виконання розрахунків)

можна визначати потрібну кількість запасних частин для забезпечення ними технології обслуговування та ремонту тепловозів.

Основна частина дослідження.

Процес відмов деталей локомотивів в експлуатації є випадковим, тобто не можна достатньо точно спрогнозувати, яка деталь і в який час може відмовити. Виходячи з цього для утримання локомотивів у справному та працездатному стані комплект запасних частин (у подальшому – елементів) повинен забезпечити своєчасну їх заміну з певною ймовірністю [14].

Для ТО локомотивів постачання має масовий характер. Це дозволяє при розгляді процесу забезпечення запасними частинами використовувати математичний апарат теорії масового обслуговування. При цьому можна зробити наступні припущення [14].

1. Є система обслуговування запасними елементами, яка складається з великої кількості однотипних елементів, що входять у комплект $Z_{3,4}$. Під системою мається на увазі система технічного обслуговування тепловозів (ТО), а сам тепловоз – як об'єкт цієї системи. У систему на обслуговування надходить необмежений найпростіший потік вимог, що складається із таких найпростіших потоків:

- потік відмов деталей Λ_1 , які знаходяться у роботі під час експлуатації тепловоза з параметрами потоку відмов

$$\Lambda_1 = m \lambda_1, \quad (1)$$

де λ_1 – інтенсивність відмов деталей тепловоза, які знаходяться у роботі під час експлуатації тепловоза;

m – кількість елементів;

- потік відмов (ремонтів) Λ_2 деталей, для комплекту $Z_{3,4}$ із параметрами

$$\Lambda_2 = n_3 \lambda_2, \quad (2)$$

де λ_2 – інтенсивність відмов (ремонтів) деталей для комплекту $Z_{3,4}$;

n_3 – кількість деталей даного типу.

Тоді при наявності запасних елементів цього типу в $Z_{3,4}$ сумарний потік відмов складе

$$\Lambda_c = \Lambda_1 + \Lambda_2 = m \lambda_1 + n_3 \lambda_2. \quad (3)$$

2. При надходженні потоку вимог від тепловоза (який знаходиться на ТО) або від комплекту запасних частин $Z_{3,4}$ на запасний вузол або деталь він негайно задовольняється одним із вільних елементів. При відсутності такого елемента система приймає заявку на обслуговування (чергову вимогу), але при цьому виникає певна ймовірність простою локомотива, який очікує ремонту [14].

3. Кожний елемент комплекту $Z_{3,4}$ може одночасно обслуговувати тільки одна чергова вимога. Проведеними дослідженнями на кафедрі "Експлуатація та ремонт рухомого складу" УкрДУЗТ було встановлено, що час обслуговування однієї вимоги одним елементом $Z_{3,4}$ підпорядкований експоненціальному закону з відповідним математичним очікуванням і часом обслуговування $t_{обсл}$.

4. У кожний момент часу система забезпечення об'єкта одним типом запасних елементів $Z_{3,4}$ може знаходитися в одному з таких станів:

- у комплекті $Z_{3,4}$ є всі елементи;
- у комплекті $Z_{3,4}$ відсутній один з необхідних елементів;
- зайняті два елементи комплекту $Z_{3,4}$;
-
-
- зайняті $n_3 - 1$ елементів комплекту $Z_{3,4}$ (стан n);
- зайняті все n_3 елементів комплекту $Z_{3,4}$ (стан $n_3 + 1$).

Отже, можливі всього $n_3 + 1$ станів системи забезпечення запасними елементами. Ймовірність того, що в момент часу t зайнято рівно s елементів $Z_{3,4}$, можна визначити з виразу [14]

$$P_s(t) = \left[\frac{(t_p \Lambda_c)^s}{s!} \right] (1 - e^{-vt})^s e^{-t_p \Lambda_c (1 - e^{-vt})}, \quad (4)$$

де t_p – середній час ремонту або заміни деталі із запасів $Z_{3.4}$;

v – інтенсивність потоку ремонту або заміни деталі із запасів $Z_{3.4}$.

Інтенсивність потоку ремонту або заміни деталей зі $Z_{3.4}$ визначається як [14]

$$v = \frac{1}{t_p}. \quad (5)$$

Імовірність того, що в момент часу t зайнято не більше n_3 елементів $Z_{3.4}$, визначається як сума ймовірностей $n+1$ неспільних станів від $s=0$ до $s=n_3$. Тоді

$$P_{s \leq n_3}(t) = e^{-t_p \Lambda_c (1 - e^{-vt})} \sum_{s=0}^{n_3} \left[\frac{(t_p \Lambda_c)^s}{s!} \right] (1 - e^{-vt}). \quad (6)$$

Імовірність того, що в момент часу t зайнято більше n_3 елементів $Z_{3.4}$ (подія протилежна попередній), буде складати

$$P_{s > n_3}(t) = 1 - \sum_{s=0}^{n_3} P_s(t) = 1 - e^{-t_p \Lambda_c (1 - e^{-vt})} \sum_{s=0}^{n_3} \left[\frac{(t_p \Lambda_c)^s}{s!} \right] (1 - e^{-vt}). \quad (7)$$

Розглянемо граничний випадок при $t \rightarrow \infty$.

Тоді

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{s \leq n_3}(t) = P_s(t) = 1 - e^{-t_p \Lambda_c} \sum_{s=0}^{n_3} \left[\frac{(t_p \Lambda_c)^s}{s!} \right]. \quad (8)$$

Позначивши $t_p \lambda_c$ $t_p \lambda_c$ через ρ , імовірність можна визначити як

$$P_n(\rho) = 1 - e^{-\rho} \sum_{s=0}^{n_3} \left[\frac{(\rho)^s}{s!} \right]. \quad (9)$$

Отриманий вираз використаний для розрахунку потрібної кількості запасу вузлів і деталей $Z_{3.4}$, які можуть бути

відновлені для ТО тепловозів 2ТЕ116. Для розрахунку прийнята припустима ймовірність простою об'єкта, що очікує ремонту, і

за таблицями функцій $\sum_{s=0}^{n_3} \left[\frac{(\rho)^s}{s!} \right]$ при відомому ρ визначена кількість запасних частин n_3 .

Для реалізації даного методу в локомотивних депо РФ "Південна залізниця" був зібраний статистичний

матеріал і проведений розрахунок потрібної кількості запасних вузлів та деталей тепловозів при проведенні ТО, які можуть бути відновлені.

За цими розрахунками були отримані такі залежності щодо визначення запасу вузлів і деталей, які можуть бути відновлені:

- при $P_n(\rho) = 0,15$:

$$f(n_3) = 0,0075 n_3^2 + 0,8753 n_3 - 2,057; \quad (10)$$

- при $P_n(\rho) = 0,1$:

$$f(n_3) = 0,0045 n_3^2 + 0,454 n_3 - 2,1314; \quad (11)$$

- при $P_n(\rho) = 0,05$:

$$f(n_3) = 0,004 n_3^2 + 0,0577 n_3 - 0,261; \quad (12)$$

- при $P_n(\rho) = 0,01$:

$$f(n_3) = 0,0025 n_3^2 + 0,0031 n_3 - 1,6384. \quad (13)$$

За цими залежностями розрахована та складена номограма, яка дозволяє визначати розрахункову кількість запасних вузлів і деталей тепловозів 2ТЕ116, які можуть бути відновлені (рисунок). За даною методикою складений перелік таких запасних частин.

Для запасних частин, які не підлягають відновленню, тобто коли середній час ремонту або заміни деталі із запасів $Z_{3,4}$ складає $t \rightarrow \infty$, а $v \rightarrow 0$, після підстановки цих обмежень у вираз (7) і розкриття невизначеності $0 \rightarrow \infty$, одержимо

$$\lim_{v \rightarrow 0} P_{s \geq n_3}(t) = P_n(t) = 1 - e^{-\Lambda_c t} \sum_{s=0}^{n_3} \left[\frac{(\Lambda_c t)^s}{s!} \right]. \quad (14)$$

У цьому виразі значення $\Lambda_c t$ є математичним очікуванням числа запасних елементів за час експлуатації t . Для розкриття даного виразу приймемо, що об'єкт має інтенсивність відмов Λ_c . Розподіл щільності ймовірності часу безвідмовної роботи $f(t)$ при

експоненціальному законі розподілу відмов має вигляд

$$f(t) = \Lambda_c e^{-\Lambda_c t} = \left(\frac{1}{T_0} \right) e^{-\frac{t}{T_0}}. \quad (15)$$

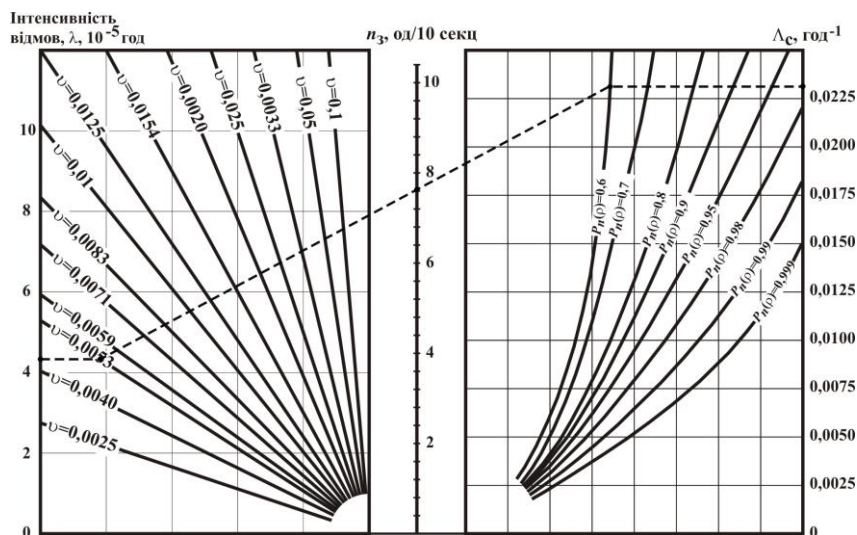


Рис. Номограма для визначення кількості запасних вузлів і деталей тепловозів 2ТЕ116, які можуть бути відновлені

Приймається, що система повинна виконувати задані функції протягом часу t (передбачуваний період експлуатації). За цей час у системі може відбутися випадкова кількість відмов n , яка обумовлена ненадійністю її окремих елементів. Замість елемента, що відмовив, щоразу із запасу вилучається новий елемент. Тому число витрачених елементів n_3 за час t буде дорівнювати числу відмов n .

За цих умов імовірність того, що за час t об'єкт вимагатиме точно n_3 запасних

елементів, визначиться за формулою Пуассона [14]

$$P_3(t) = \left[\frac{(\Lambda_c t)^{n_3}}{n_3!} \right] e^{-\Lambda_c t}, \quad (16)$$

де $\Lambda_c t$ – математичне очікування кількості запасних елементів за час експлуатації t .

Математичне очікування в цьому випадку можна визначити як

$$M_n = n_3 = \sum_{n=0}^{\infty} n_3 P_3(t) = \sum_{n_3} \left[\frac{n_3 (\Lambda_c t)}{n_3!} \right] e^{-\Lambda_c t}. \quad (17)$$

Перший член суми даного виразу при $n_3 = 0$ буде дорівнювати нулю. Отже, його можна перетворити до такого вигляду:

$$n_{cp} = \Lambda_c t e^{-\Lambda_c t} \sum_{n_3=1}^{\infty} \frac{(\Lambda_c t)^{n_3-1}}{(n_3-1)!}. \quad (18)$$

Позначимо $n_3 - 1 = k$. Тоді

$$n_{cp} = \Lambda_c t e^{-\Lambda_c t} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\Lambda_c t)^k}{k!} = \Lambda_c t e^{-\Lambda_c t} e^{\Lambda_c t} = \Lambda_c t. \quad (19)$$

Таким чином, вираз (9) можна записати у вигляді

$$P_n(t) = 1 - e^{-n_{cp}} \sum_{s=0}^{n_2} \left[\frac{(n_{cp})^s}{s!} \right]. \quad (20)$$

Задаючись припустимою ймовірністю простою локомотива через нестачу запасної частини $P_n(t)$, а також значенням часу експлуатації t і знаючи величину Λ_c , можна знайти n_{cp} , а потім за формулою (20) визначити кількість запасних елементів n_3 .

Висновки:

1. У роботі визначено, що основною умовою стабільного матеріально-технічного постачання при утриманні локомотивів є формування й контроль запасів відповідних видів запасних частин на всіх видах зберігання (цехах, площадках, коморах). Враховано, що таке постачання має масовий характер. Це у свою чергу дозволило при розгляді процесу забезпечення запасними частинами застосувати математичний апарат теорії масового обслуговування.

2. На основі отриманих залежностей запропонований порядок розрахунку щодо визначення раціонального кількісного розміру запасних частин, які можна поновити, та таких, що потребують утилізації.

3. За виконаними розрахунками створені номограми розподілу кількісних характеристик, які дозволяють за статистичними даними визначати час і обсяг поповнення запасів запасних частин і матеріалів.

4. Подальший розвиток даного дослідження передбачає створення методично-довідкового забезпечення, за яким у локомотивних депо обслуговуючий персонал може оперативно визначати потрібну кількість запасних частин того чи іншого типу та формувати на цій основі відповідний запас для організації проведення технічного обслуговування або ремонту тепловозів.

Список використаних джерел

1. Бержанір, І. А. Проблеми та напрями вдосконалення обліку виробничих запасів [Текст] / І. А. Бержанір, Т. А. Демченко // Економічний простір. – 2016. – № 107. – С. 161-168.
2. Бродецкий, Г. Л. Управление запасами [Текст] / Г. Л. Бродецкий. – М.: Эксмо, 2008. – 352 с.
3. Букан, Дж. Научное управление запасами [Текст] / Дж. Букан, Э. Кенигсберг. – М.: Наука, 1967. – 424 с.
4. Бутинця, Ф. Ф. Економічний аналіз [Текст] : навч. посібник / Ф. Ф. Бутинця. – Житомир: ПП "Рута", 2003. – 680 с.
5. Галушка, З. І. Стратегічний менеджмент [Текст] : навч. посібник / З. І. Галушка, І. Ф. Комарницький. – Чернівці: Рута, 2006. – 248 с.
6. Кислий, В. М. Логістика. Теорія та практика [Текст] : навч. посібник / В. М. Кислий, О. А. Біловодська, О. М. Олефіренко. – К.: Центр учбової літератури, 2010. – 360 с.

7. Крикавський, Є. В. Логістичне управління [Текст] : підручник / Є. В. Крикавський. – Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2005. – 684 с.
8. Лукинський, В. С. Модели и методы теории логистики [Текст] : учебник / В. С. Лукинський. – М.: "Питер", 2003. – 176 с.
9. Оспіщев, В. І. Вступ до спеціальності "Логістика" [Текст] : навч. посібник / В. І. Оспіщев. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 106 с.
10. Прокопенко, І. Ф. Методика та методологія економічного аналізу [Текст] : навч. посібник / І. Ф. Прокопенко, В. І. Ганін. – К.: Центр учбової літератури, 2008. – 430 с.
11. Савицька, Г.В. Економічний аналіз діяльності підприємства [Текст] / Г.В.Савицька. – К.: Знання, 2004. – 654 с.
12. Сакович, В. А. Модели управления запасами [Текст] : учеб. пособие / В. А. Сакович. – Минск: Наука и техника, 1986. – 319 с.
13. Тридід, О. М. Логістика [Текст] : навч. посібник / О. М. Тридід, С. В. Азаренкова, С. В. Мішина. – К.: Знання, 2008. – 566 с.
14. Четвергов, В. А. Надежность локомотивов [Текст] / В. А. Четвергов, А. Д. Пузанков. – М.: Маршрут, 2003. – 415 с.
15. Alem D., Alistair C., Moreno A. Stochastic network models for logistics planning in disaster relief [Text] // European Journal of Operational Research. – Vol. 255, Issue 1, 16 November 2016. – P. 187-206.
16. Chen W., Guinet A., Ruiz A. Modeling the logistics response to a bioterrorist anthrax attack [Text] // European Journal of Operational Research. – Vol. 254, Issue 2, October 2016. – P. 458-471.
17. Dube N., Van der Vaart T., Teunter, R. Host government impact on the logistics performance of international humanitarian organizations [Text] // Journal of Operations Management. – Vol. 47–48, November 2016. – P. 44-57.
18. Kwesi-Buor J., Menachof D., Talas R. Scenario analysis and disaster preparedness for port and maritime logistics risk management [Text] // Accident Analysis & Prevention, In press, corrected proof, Available online 1 August 2016.
19. Oualid Kherbash, Marian Liviu Mocan. A Review of Logistics and Transport Sector as a Factor of Globalization [Text] // Procedia Economics and Finance. – Vol. 27, 2015. – P. 42-47.
20. Sami B., Márquez-Ramos L., Inmaculada M. Relationship between logistics infrastructure and trade: Evidence from Spanish regional exports [Text] // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – Vol. 72, February 2015. – P. 47-61.
21. Teodor G., Crainic G. Montreuil B. Physical internet enabled Hyperconnected City Logistics [Text] // Transportation Research Procedia. – Vol. 12, 2016. – P. 383-398.

Ольховська Тетяна Олександрівна, інженер, РФ "Південна залізниця". Тел.: (093) 151-73-15.

Olkhovska Tatyana A., engineer, RF "Southern Railway". Tel.: (093) 151-73-15.

Стаття прийнята 11.12.2017 р.

УДК 697.547

ВЫБОР БАЗИСНОГО ПЕРИОДА ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Д-р техн. наук А. М. Тарадай, канд. техн. наук А. В. Гвоздецкий,
асп. С. В. Фомич (ХНУСА)

ВИБІР БАЗИСНОГО ПЕРІОДУ ДЛЯ СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ВОДОСПОЖИВАННЯ

Д-р техн. наук О. М. Тарадай, канд. техн. наук О. В. Гвоздецький,
асп. С.В. Фоміч (ХНУБА)

CHOICE OF BASE PERIOD FOR STATISTICAL DESIGN OF UNEVENNESS OF WATER CONSUMPTION

Dr. sc. sciences O.M. Taraday, phd. tehn. O.V. Gvozdetskiy, pg. S.V. Fomich

Приведены статистические данные по расходу горячей воды на нужды жилых микрорайонов от котельной. Проведено исследование фактических показателей работы системы централизованного горячего водоснабжения. Проведено статистическое моделирование неравномерности потребления горячей воды. В результате исследования установлено, что снижение расхода в системе горячего водоснабжения в летний период года составляет 20 % по сравнению с зимним периодом года и увеличение расхода горячей воды в выходные дни по сравнению с рабочими днями возрастает до 15 %.

Ключевые слова: базисный период, система горячего водоснабжения, логическая фильтрация, статистическое моделирование, неравномерность водопотребления.

Наведено статистичні дані витрат гарячої води на потреби житлових мікрорайонів від котельної. Досліджено фактичні показники роботи системи централізованого гарячого водопостачання. Проведено статистичне моделювання нерівномірності споживання гарячої води. У результаті дослідження встановлено, що зниження витрати в системі гарячого водопостачання в літній період року становить 20 % порівняно із зимовим і збільшення витрати гарячої води у вихідні дні порівняно з робочими днями зростає до 15 %.

Ключові слова: базисний період, система гарячого водопостачання, логічна фільтрація, статистичне моделювання, нерівномірність водоспоживання.

We collected statistical data on the expense of hot water on the needs of dwellings microregions, from a boiler room. A study of actual indexes of work of the centralized hot water system is undertaken. In the process of research an array treated from 79000 sentinel indexes, an integral method is create an array from 3300 daily allowance values and an array is formed 470 a week's values for further treatment. In general complication an analysis plugged in itself treatment more than 600000 separate values and indexes. We are conduct the statistical design of unevenness of consumption of hot water. Approximating functions are certain a least squares method for every separate array of data. It is set as a result of research, that a decline of expense the hot water system in a summer period of year is 20 % as compared to the winter period of year, and the increase of expense of hot water at the weekend, as compared to working days, increases to 15 %.

Keywords: base period, hot water system, logical filtration, statistical design, unevenness of water consumption.

Введение. Система горячего водоснабжения предназначена для удовлетворения гигиенических и бытовых нужд потребителей. Неравномерность потребления горячей воды приводит к неравномерности тепловой нагрузки системы горячего водоснабжения в течение суток и дней недели, что в свою очередь приводит к изменению расхода теплоносителя в тепловых сетях и на абонентских вводах потребителя [1, 2]. При расчетах абонентских вводов ориентируются на соотношение нагрузок систем отопления и горячего водоснабжения. Если расчетное значение отличается от фактического, то у потребителя наблюдается отклонение температур воздуха внутри помещений. Проведенные исследования позволят уточнить данные о расходах и нагрузках систем горячего водоснабжения, а также баланс нагрузок систем отопления и горячего водоснабжения у потребителей.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы, связанные с работоспособностью систем горячего водоснабжения, – одно из направлений работы системы теплоснабжения в целом [3–7]. В течении 2003–2017 годов проведены приборные измерения расходов горячей и холодной воды. По итогам собранной информации водопотребления после ее обработки сделан вывод, что общее водопотребление холодной и горячей воды на одного человека за 2003 год составляет $9,8 \div 10,6$ м³/чел. Расходы воды на одного человека за 2016÷2017 годы снизились на 30÷35 % по сравнению с 2003 годом [8, 9]. Значительный рост цены на тепловую энергию приводит к частичной децентрализации систем горячего водоснабжения. Происходит снижение расходов централизованного горячего водоснабжения жилым фондом. Рассматривая сегодняшнюю ситуацию можно сделать вывод, что расчетная тепловая нагрузка системы горячего

водоснабжения будет выше фактической за счет децентрализации систем горячего водоснабжения и экономии потребления горячей воды потребителем, связанного с платежеспособностью населения. Вопрос снижения водопотребления горячей воды влияет на планирование расхода топлива на источнике теплоснабжения.

Определение цели и задачи исследования. Определить характерные периоды водопотребления жилых микрорайонов централизованного горячего водоснабжения путем статистического моделирования неравномерности водопотребления, методом наименьших квадратов определить аппроксимирующие функции для каждого отдельного массива данных. Получить процентное соотношение увеличения или уменьшения водопотребления по дням недели и периоду года [10, 11].

Основная часть исследования. С целью определения наиболее характерных (базисных) периодов водопотребления по каждому из районов централизованного горячего водоснабжения было проведено исследование фактических показателей работы существующих систем централизованного горячего водоснабжения (ГВС). В процессе исследования был обработан массив из 79000 часовых показателей, интегральным методом создан массив из 3300 суточных значений и сформирован массив 470 недельных значений для дальнейшей обработки. В общей сложности анализ включал в себя обработку более чем 600000 отдельных значений и показателей. Тип, марка приборов, применяемых для измерения расходов горячей воды, приведены в табл. 1.

Для выявления основных показателей и особенностей водопотребления было выполнено статистическое моделирование неравномерности потребления горячей воды.

Анализ выполнялся в два основных этапа.

Таблица 1

Перечень приборов учета, используемых при исследовании

Котельная	Приборы учета	
	горячей воды	холодной воды на нужды ГВС
Василия Сергиенко, 7	Двухканальный ультразвуковой тепловосчетчик СВТУ-10М (М1) производства ООО "Фирма СЕМПАЛ Ко ЛТД" (Киев)	Расходомерный комплекс ИРКА производства ООО НПП "Водомер" (Харьков)
	Расходомерный участок Ду-500 – на трубопроводе подачи ГВС потребителю ($Q_{min} = 71 \text{ м}^3/\text{ч}$; $Q_t = 141 \text{ м}^3/\text{ч}$; $Q_{max} = 7100 \text{ м}^3/\text{ч}$)	Расходомерный участок Ду-250 ($Q_{min} = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$; $Q_t = 31,3 \text{ м}^3/\text{ч}$; $Q_{max} = 1870 \text{ м}^3/\text{ч}$)
	Расходомерный участок Ду-250 – на циркуляционном трубопроводе ГВСот потребителя ($Q_{min} = 18 \text{ м}^3/\text{ч}$; $Q_t = 35 \text{ м}^3/\text{ч}$; $Q_{max} = 1800 \text{ м}^3/\text{ч}$)	Пределы допускаемой относительной погрешности теплосчетчика при измерении объема (массы) теплоносителя составляют, в интервалах диапазона: от Q_{min} (включительно) до $Q_t - \pm 3 \%$; от Q_t (включительно) до $Q_{max} - \pm 1 \%$
	Пределы допускаемой относительной погрешности теплосчетчика при измерении объема (массы) теплоносителя составляют, в интервалах диапазона: от Q_{min} (включительно) до $Q_t - \pm 3 \%$; от Q_t (включительно) до $Q_{max} - \pm 1 \%$	

Первый – логическая фильтрация для исключения из выборки данных «аномальных» результатов. Таким образом, были исключены из дальнейшего рассмотрения все «недели», имеющие особенности технологического происхождения (полная или частичная

остановка подачи горячей воды, внештатные и аварийные ситуации на источниках теплоснабжения, тепловых сетях и др.).

В результате логической фильтрации массивы данных были сокращены в среднем на 28 % (табл. 2).

Таблица 2

Результат логической фильтрации данных

Котельная	Данные от котельной		
	Исходное количество элементов массива	Конечное количество элементов массива	Процент сокращения данных
ул. Василия Сергиенко, 7	156	113	72

Второй – определение «базисного» периода методом наименьших квадратов.

Массив недельных данных, сформированный в результате логической фильтрации, был разделен на две группы по показателю «средняя температура

холодной воды за неделю» и приведен в табл. 3. Данное разделение характеризует особенности режимов работы системы ГВС в отопительный и неотопительный периоды.

Таблица 3

Разделение массива данных по критерию « $t_{х.в.}$ »

Котельная	Данные от котельной	
	Массив данных с $t_{х.в.} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Массив данных с $t_{х.в.} < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
ул. Василя Сергиенко, 7	48	65

Используя полученные массивы данных, были построены графики по критериям зависимости показателей «Удельный расход горячей воды», т/Гкал, от фактической температуры холодной воды, $^{\circ}\text{C}$. Методом наименьших квадратов определены аппроксимирующие функции для каждого отдельного массива данных. В качестве примера приведены результаты

обработки массива данных котельной по ул. Василя Сергиенко, 7 и построен график № 1 аппроксимирующей функции (экспоненциальная функция) в массиве данных удельных расходов горячей воды при температуре холодной воды до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1) и аналогичный график № 2 при логарифмической функции ($y = 5,6335 \ln(x) + 1,9147$) (рис. 2).

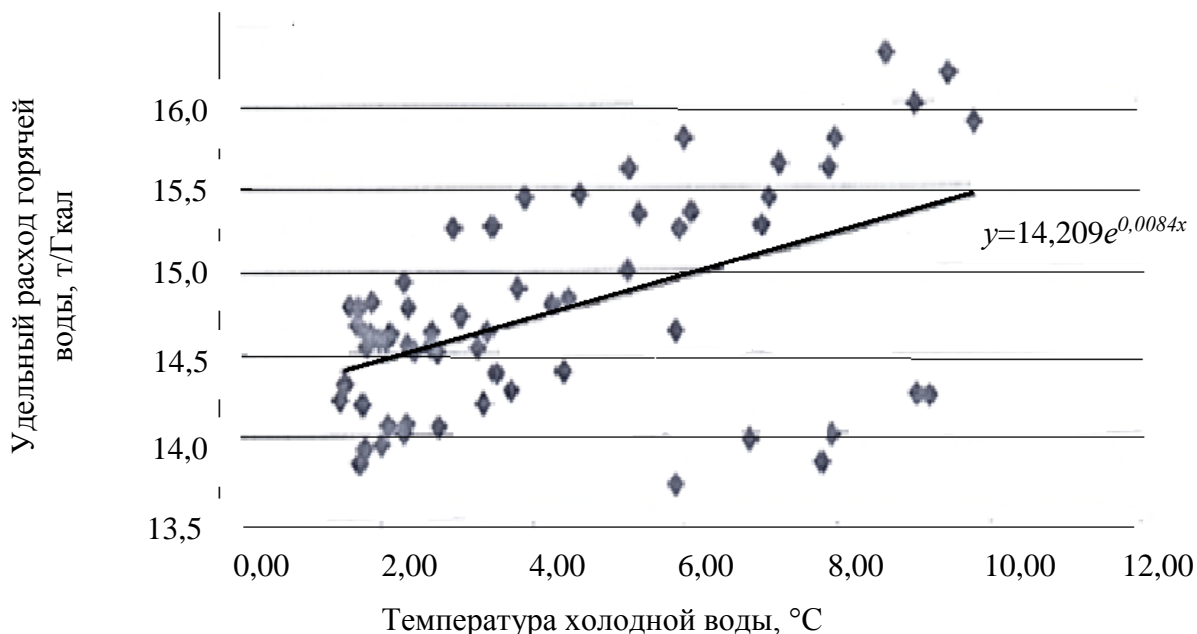


Рис. 1. График функций № 1

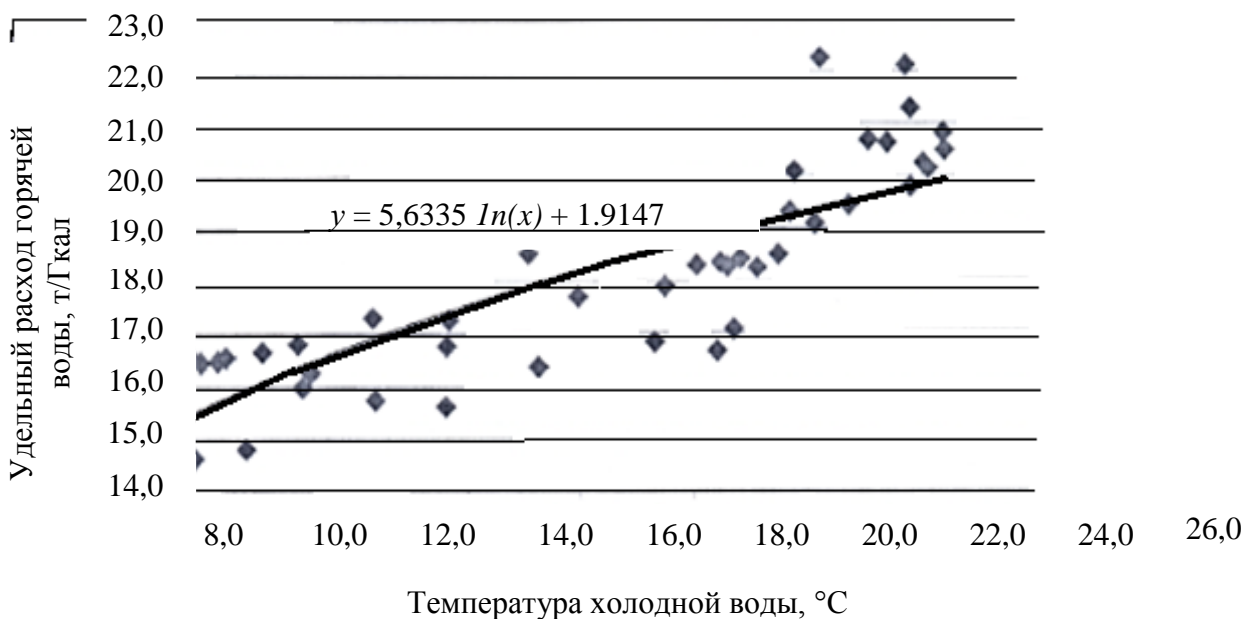


Рис. 2. График функций № 2

Расчет аппроксимирующей функции в каждой точке, соответствующей элементу массива данных, позволил выявить собственно «базисные» недели водопотребления. В качестве «базисных» были выбраны среднестатистические недели, которые имели наименьшее отклонение от значения функции в соответствующей точке.

Для дальнейшего анализа используются массивы часовых и суточных показателей «базисных» недель.

Изучение режима потребления в системе централизованного горячего водо-

снабжения начинается с анализа «базисной» недели по среднесуточным значениям. Выполняя анализ часовых значений потребления горячей воды, необходимо учитывать как особенности режима по дням недели, так и влияние сезонности.

Результатом изучения особенностей режимов водопотребления может служить построение безразмерного графика суточного потребления горячей воды.

В табл. 4 представлены данные «базисной» недели, определенной методом наименьших квадратов.

Таблица 4

Суточное потребление ГВС в разрезе «базисной» недели, т

День недели	Период по температурам холодной воды	
	t х.в. < 10	t х.в. > 10
Понедельник	7528	6408
Вторник	7408	6211
Среда	7367	6248
Четверг	7358	6295
Пятница	7209	6151
Суббота	7566	6245
Воскресенье	7960	6599
ВСЕГО	52396	44157

Для анализа изменения расхода в системе горячего водоснабжения по дням недели, периодам года построены графики

суточных значений водопотребления «базисной» недели (рис. 3, 4).

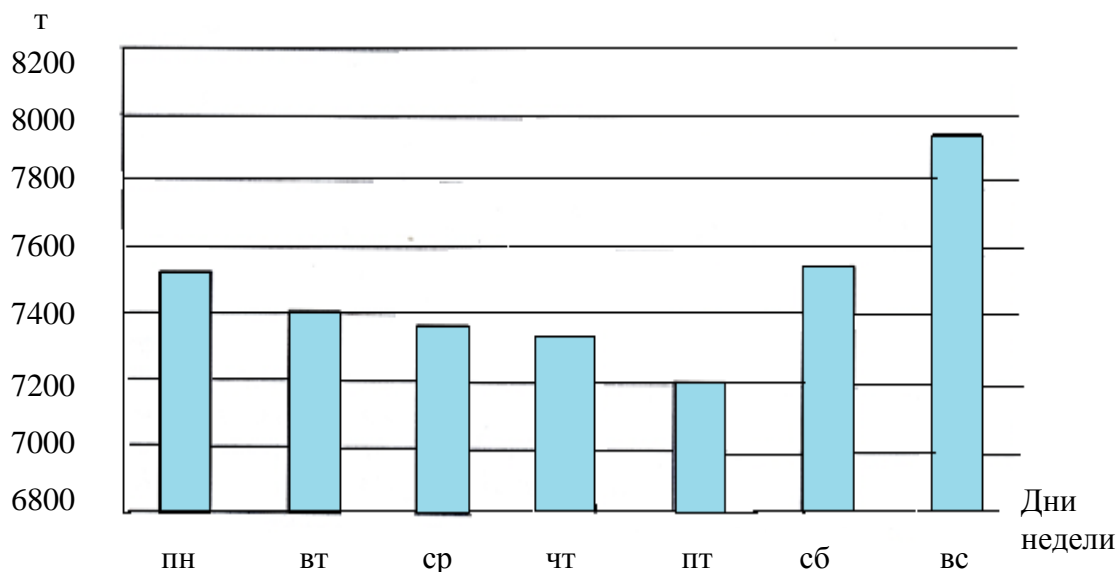


Рис. 3. График суточного потребления ГВС на котельной по ул. Василя Сергиенко, 7 «базисной» недели при температуре холодной воды ниже +10 °С:
пн – понедельник; вт – вторник; ср – среда; чт – четверг; пт – пятница;
сб – суббота; вс – воскресенье

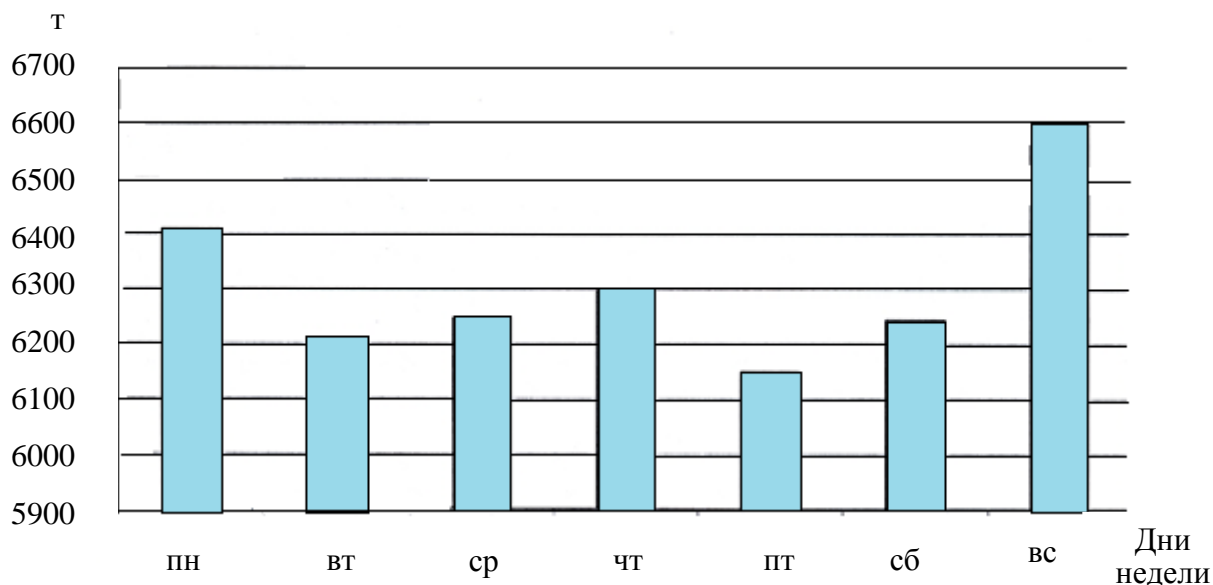


Рис. 4. График суточного потребления ГВС на котельной по ул. Василя Сергиенко, 7 «базисной» недели при температуре холодной воды выше +10 °С:
пн – понедельник; вт – вторник; ср – среда; чт – четверг; пт – пятница;
сб – суббота; вс – воскресенье

Анализ, представленный в табл. 5 и на вышеприведенных графиках, явно

указывает на увеличение расхода горячей воды в выходные дни.

Таблиця 5

Анализ суточного потребления ГВС в разрезе недели, %

Дни недели	Период по температурам холодной воды	
	$t_{х.в.} < 10$	$t_{х.в.} > 10$
Понедельник	14.4	14.5
Вторник	14.1	14.1
Среда	14.1	14.1
Четверг	14.0	14.3
Пятница	13.8	13.9
Суббота	14.4	14.1
Воскресенье	15.2	14.9
ВСЕГО	100	100

Для более наглядной иллюстрации увеличения потребления горячей воды в выходные дни проанализировано отношение среднесуточного потребления горячей

воды в выходные (суббота – воскресенье) и рабочие (понедельник – пятница) дни (табл. 6, рис. 5).

Таблиця 6

Анализ потребления ГВС в рабочие и выходные дни

Потребление	Период по температурам холодной воды	
	$t_{х.в.} < 10$	$t_{х.в.} > 10$
Среднесуточное потребление в рабочие дни, т/ч	7374	6263
Среднесуточное потребление в выходные дни, т/ч	7763	6422
Отношение среднесуточного потребления в выходные и рабочие дни, %	5	3

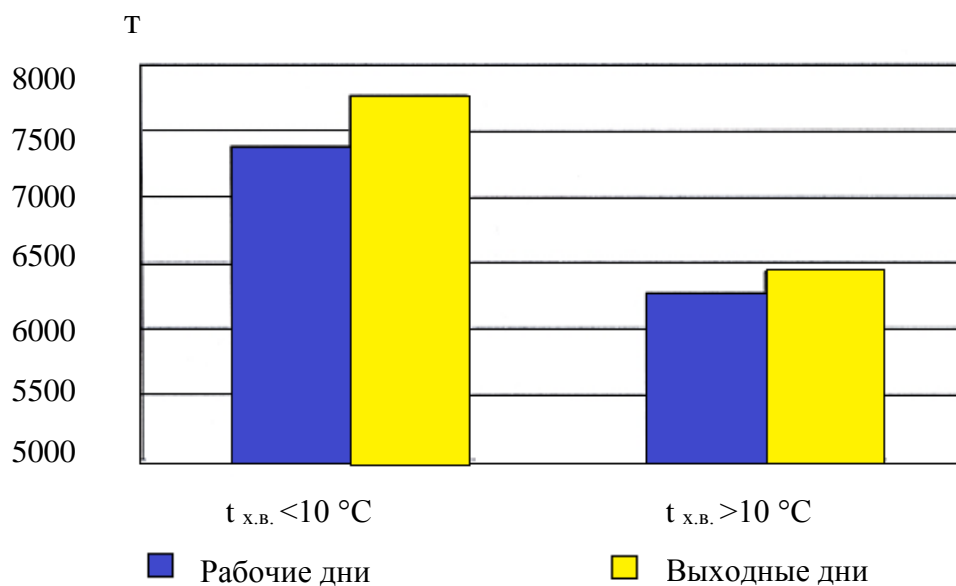


Рис. 5. Среднесуточный расход ГВС в рабочие и выходные дни «базисной» недели при температуре холодной воды ниже $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше $+10 \text{ }^\circ\text{C}$

Изученные данные свидетельствуют о том, что на режим потребления горячей воды оказывает влияние не только день недели, но и время года. Так, совершенно очевидно, что в теплое время года ($t_{х.в.} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) расход в системе горячего водоснабжения снижается по сравнению с расходом в холодное время года ($t_{х.в.} < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Это связано в первую очередь с изменением температуры холодной воды, которая может

колебаться в значительных пределах (ориентировочно от 1 до 24 $^{\circ}\text{C}$). Кроме того, значительная часть городского населения летом в субботные и воскресные дни выезжает в загородные зоны, т. е. в те дни, когда в жилом секторе зимой наблюдаются максимальные разборы горячей воды.

Сравнение расходов горячей воды «базисной» недели в холодное и теплое время года (рис. 6).

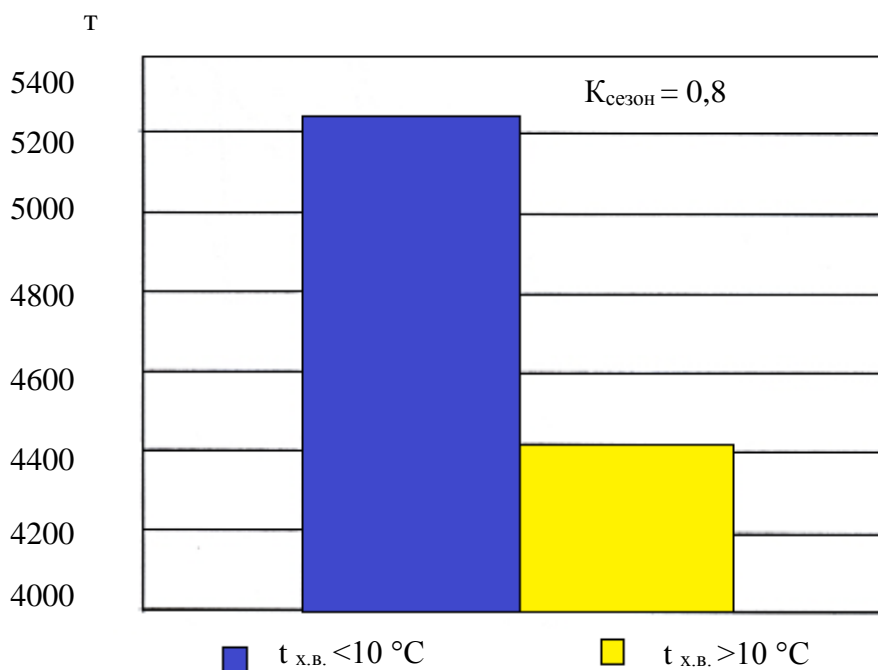


Рис. 6. Анализ сезонного различия в потреблении ГВС

Выводы. Согласно анализа собранных данных, проведенных исследований, а также данных статистического моделирования можно сделать следующие выводы:

- на режим потребления горячей воды оказывает влияние время года. Снижение расхода в системе горячего водоснабжения

в летний период составляет 20 % по сравнению с зимним периодом года;

- в системе централизованного горячего водоснабжения в выходные дни по сравнению с рабочими днями потребление возрастает от 8 до 15 %.

Список использованных источников

1. Теплоснабжение [Текст] / А. А. Ионин, Б. М. Хлыбов, В. Н. Братенков, Е. Н. Терлецкая; под ред. А. А. Ионина. – М. : Стройиздат, 1982. – 335 с.
2. Єнін, П. М. Теплопостачання [Текст] : навч. посібник / П. М. Єнін, Н. А. Швачко; под ред. П. М. Єніна. – К.: Кондор, 2007. – Ч. 1: Мережі та споруди. – 244 с.

3. Тарадай, О. М. Возможности снижения аварийности сетей централизованного горячего водоснабжения путем деаэрации воды [Текст] / О. М. Тарадай, С. В. Фомич, П. М. Гламаздин // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – К.: КНУБА, 2016. – №19. – С. 117-124.

4. Значительное снижение расхода топлива путем внедрения современных методов реновации абонентов [Текст] / А. М. Тарадай, М. А. Яременко, Е. С. Есин, С. В. Фомич // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. – №1(83). – С. 158-161.

5. Причины массовых отказов систем централизованного горячего водоснабжения [Текст] / А. М. Тарадай, Е. С. Есин, С. В. Фомич, Н. С. Болотских // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2017. – №1(87). – С. 188-191.

6. Анализ работы систем учета расхода тепловой энергии в Харьковском регионе [Текст] / А. Ф. Редько, А. М. Тарадай, И. Г. Кириленко, М. А. Яременко // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2008. – №46. – С. 233-236.

7. Малая, Э. М. Повышение уровня эксплуатационной надежности тепловых сетей реконструкции систем теплоснабжения в условиях ограниченного финансирования [Текст] / Э. М. Малая, С. А. Сергеева // Новости теплоснабжения. – 2006. – №4. – С. 41-44.

8. Тарадай, А. М. Исследование динамики изменения потребления горячей воды населения [Текст] / А. М. Тарадай, В. Б. Поволочко, С. В. Фомич // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2017. – №2(88). – С. 203-206.

9. Taraday, O. Urban renovation of hot water supply system [Text] / O. Taraday, O. Gvozdetskiy, S. Fomich // Matec. Web of conferences. – 2017. – №116. – P.1-7.

10. Шафлик, В. Современные системы горячего водоснабжения [Текст] / под ред. В. Шафлик. – К.: ДП ИПЦ «Такі справи», 2010. – 316 с.

11. Merenkov, K. Optimitzation of development of heat and water supply system [Text] / K. Merenkov, E. Sennova, S. Sumarokov // Sov. Techn.Rev., A, Energy. – NewYork: Harwood Academic Publ. GmbH. 1994. – Vol.6, № 4. – P.1-31.

Тарадай Олександр Михайлович, д-р техн. наук, професор кафедри теплогазопостачання, вентиляції та використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.:(057)700-16-40.

Гвоздецький Олександр Вадимович, канд. техн. наук, доцент кафедри теплогазопостачання, вентиляції та використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (050) 88-624-88. E-mail: npp-tghv@ukr.net.

Фомич Сергій Вікторович, аспірант кафедри теплогазопостачання, вентиляції та використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-16-40.

Taraday Alexander, Dr. Sc. science professor of heat and gas supply, ventilations and uses of thermal waste energies Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (057) 700-16-40.

Gvozdetskiy Alexander, PhD. Sc. associate professor of heat and gas supply, ventilations and uses of thermal waste energies Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (050) 88-624-88.

E-mail: npp-tghv@ukr.net.

Fomich Sergey, graduate student of heat and gas supply, ventilations and uses of thermal waste energies Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (057) 700-16-40.

Стаття прийнята 15.2017 р.

УДК 624.074

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ СВОДЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ

Асп. А. В. Бойко, д-р техн. наук В. В. Стоянов,
кандидаты техн. наук А. А. Бояджи, О. М. Коршак, С. М. Чучмай (ОГАСА)

ПРОЕКТУВАННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ ПОЛІГОНАЛЬНИХ СКЛЕПІНЧАСТИХ ПОКРИТТІВ

Асп. О. В. Бойко, д-р техн. наук В. В. Стоянов,
кандидати техн. наук А. О. Бояджи, О. М. Коршак, С. М. Чучмай (ОДАБА)

DESIGN OF POLYGONAL COVERAGE COATINGS OF WOOD

Pg. O. V. Boyko, dr. tech. sc. V.V. Stoyanov,
phd. tech. sc. A. O. Voiadzhi, O. M. Korshak, S. M. Chuchmai

Рассмотрены варианты использования деревянных двутавровых балок со стенкой из OSB в качестве несущих элементов для полигональных сводчатых покрытий зданий различных прогонів. Легкость и небольшая стоимость таких конструкций открывает новые возможности их применения в строительстве. Полигональную форму покрытия позволяют придать специальные стальные соединительные элементы. Приведены расчеты конструкций пролетом 12 и 18 м и анализ их напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: покрытия, арки, своды, балки, напряжения, конструкции.

Розглянуто варіанти використання дерев'яних двотаврових балок зі стінкою з OSB як несучих елементів для полігональних склепінчастих покриттів будівель різних прольотів. Легкість і невелика вартість таких конструкцій відкриває нові сфери їх застосування в будівництві. Полігональної форми покриттю дають змогу надати спеціальні сталеві з'єднувальні елементи. Наведено розрахунки конструкцій прогоном 12 і 18 м і аналіз їх напружено-деформованого стану.

Ключові слова: покриття, арки, склепіння, балки, напруги, конструкції.

Currently in Ukraine the production of wooden I-beams with a wall of OSB is a steady increase. Analysis of the structural forms of composite beams, the features of their use in the frame of buildings, along with the existing methods of the composite wooden beams calculating, indicate that, if certain requirements are met for wooden I-beams, they can be used in polygonal vaulted coverings span of 12-18 m. Polygonal shape of the coating is made possible by special steel connecting elements. During the design, various solutions of the nodes (hinged, flexible, and rigid) were considered. Based on the preliminary calculations, hinge nodes were selected.

The considered constructions are made of wooden I-beams with OSB-wall next sizes: beam height 120 mm, belt height 40 mm, belt width 90 mm, thickness of OSB wall 10 mm, length 1400 mm and more, connected by pairs of metal pads. Calculations of the structures with a span of 12 and 18 meters and an analysis of their stress-strain state are given.

Keywords: coverings, arches, vaults, beams, tensions, structures.

Введение. В настоящее время в Украине наблюдается устойчивое увеличение объемов производства двутавровых деревянных балок (ДДБ) со стенкой из OSB. Это значительно снизило импорт таких изделий и наполнило отечественный строительный рынок легкими и эффективными конструкциями собственного производства. Отметим, что составные балки с элементами из листа OSB все чаще используются в каркасах малоэтажных зданий, а также в качестве элементов покрытий и перекрытий в каменных зданиях. Легкость и небольшая стоимость таких конструкций открывает новые сферы их применения в строительстве [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Проведенные ранее на кафедре МДиПК ОГАСА исследования прочности и деформативности двутавровых деревянных балок со стенкой из OSB [1–3], а также анализ различных конструктивных форм составных балок и особенностей их применения в каркасе зданий показали, что при выполнении определенных конструктивно-технологических требований к ДДБ [4] (в совокупности с существующими методиками расчета таких балок) они могут быть использованы в полигональных сводчатых покрытиях (рис. 1) пролетом 12–18 м.

Определение цели и задания исследования. Целью данного исследования является определение и анализ напряженно-деформированного состояния полигональных сводчатых конструкций при различных вариантах их конструктивных элементов. Для достижения этой цели были поставлены следующие задания:

- 1) предварительная разработка вариантов узлов конструкций покрытия пролетом 12 и 18 м;
- 2) разработка моделей таких конструкций (ПК Autodesk Inventor 2018);
- 3) разработка для этих конструкций расчетных схем (ПК ANSYS R14.5);
- 4) расчет вариантов и анализ полученных результатов.

Основная часть исследования. Расчет двух видов покрытия (без опор для

12 м пролета (рис. 1,а) и с опорами для 18 м (рис. 1,б)) показал, что при опирании полигональной арки без затяжек на стены здания усилия распора воспринимаются стенами здания. Изгибающие моменты, возникающие в этом случае в стенах, вызывают на внутренних сторонах поперечных сечений этих стен растягивающие усилия – в железобетонных стенах для восприятия этих усилий нужно подбирать дополнительную арматуру, в кирпичных же стенах возникновение таких усилий недопустимо. Таким образом, при применении таких конструкций нужно использовать арки с затяжками или предусмотреть другие решения, направленные на отвод действия распора на стены [5].

Наличие несущих стен между опорами конструкции позволяют установить дополнительные стойки и увеличить жесткость конструкции или облегчить её. Также дополнительные стойки можно установить при необходимости на фронтонах здания [6].

Рассматриваемые полигональные покрытия пролетом 12 м набираются из деревянных двутавровых балок с OSB-стенкой следующих размеров: высота балки 120 мм, высота поясов 40 мм, ширина пояса 90 мм, толщина стенки из OSB 10 мм, длина 1400 мм и более, соединенных между собой парными металлическими накладками [1]; при увеличении пролета покрытия до 18 м размеры поясов сохраняются, а высоту стенки нужно увеличить в два раза для обеспечения жесткости конструкции покрытия.

Наиболее распространенной конструктивной формой составной балки с элементами из листа OSB является балка со сплошными поясами из дерева, у которой стенка из листа OSB вклеена в паз, устроенный в поясе балки. К недостаткам данной конструктивной формы можно отнести необходимость специального оборудования для устройства пазов и прессов для выдержки конструкций балки на период высыхания клея [7].

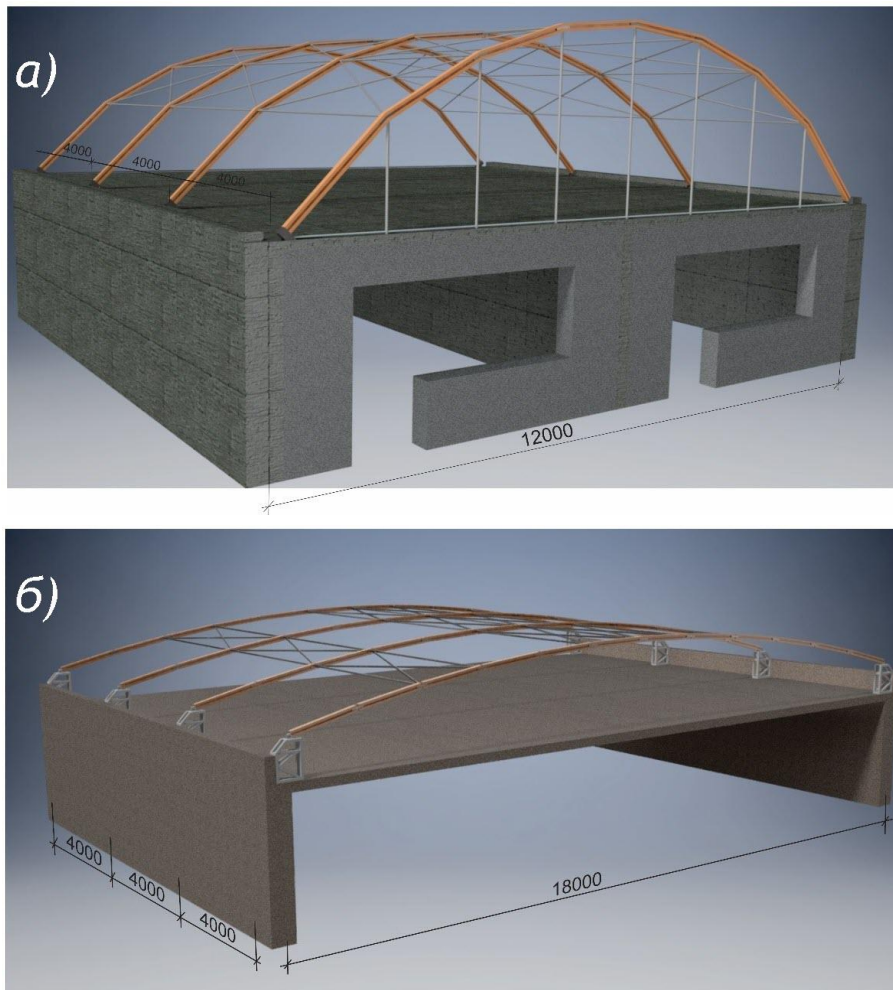


Рис. 1. Полигональные сводчатые покрытия:
а – пролетом 12 м; б – пролетом 18 м

В лаборатории деревянных конструкций ОГАСА были проведены испытания составных деревянных балок пролетом 2,4 м следующего конструктивного решения: клефанерная балка с плоской стенкой, вклеенной в паз в полках из цельной древесины (рис. 2); клефанерная балка с плоской стенкой и с поясами из деревянных брусков, приклеенных по бокам стенки; клефанерная балка со стенкой, вклеенной в паз в полках из клееной древесины; составная балка с поясами из деревянных брусков, соединенных со стенкой из OSB на шурупах. Для исследуемых составных деревянных балок были рассчитаны теоретические прогибы и максимальная несущая нагрузка с

использованием существующей нормативной методики расчета по ДБН.

Результаты численного расчета представлены в виде изополей распределения напряжений (рис. 3) и перемещений в расчетной модели балки (рис. 4). По виду распределения напряжений в элементах конструкции можно сказать следующее: нормальные напряжения достигают максимальных значений в 1/4 пролета в узле стыка прямолинейных элементов конструкции (рис. 5) и близки к расчетному сопротивлению на растяжение – сжатие плиты OSB толщиной 10 мм и снижаются к середине пролета арки; касательные напряжения в элементах стенки в 4–5 раз ниже нормальных напряжений с

максимумом на опорах і в місцях приложення нагрузки.

В заключение отметим, что технологические проблемы армирования, а также разработка новых конструктивных решений

стыков требуют дополнительных исследований (расчетных и экспериментальных), которые вполне выполнимы в условиях интенсивного развития современных технологий.

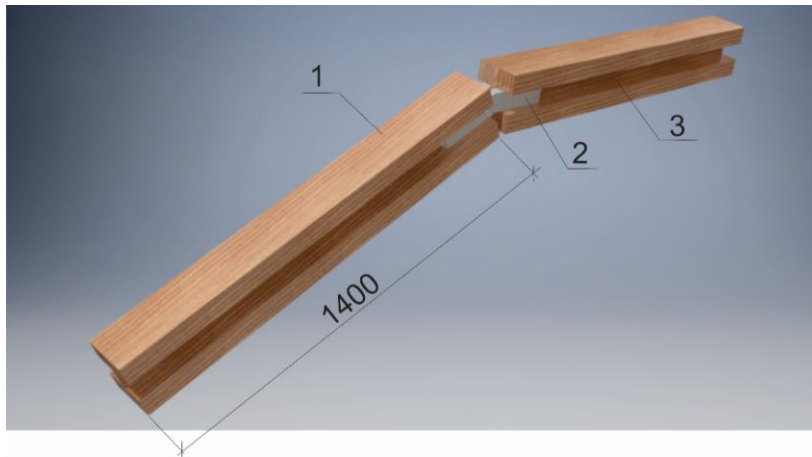


Рис. 2. Деревянные двутавровые балки (ДДБ):
1 – полка балки (90x40 мм); 2 – соединительный элемент; 3 – стенка из OSB (10 мм)

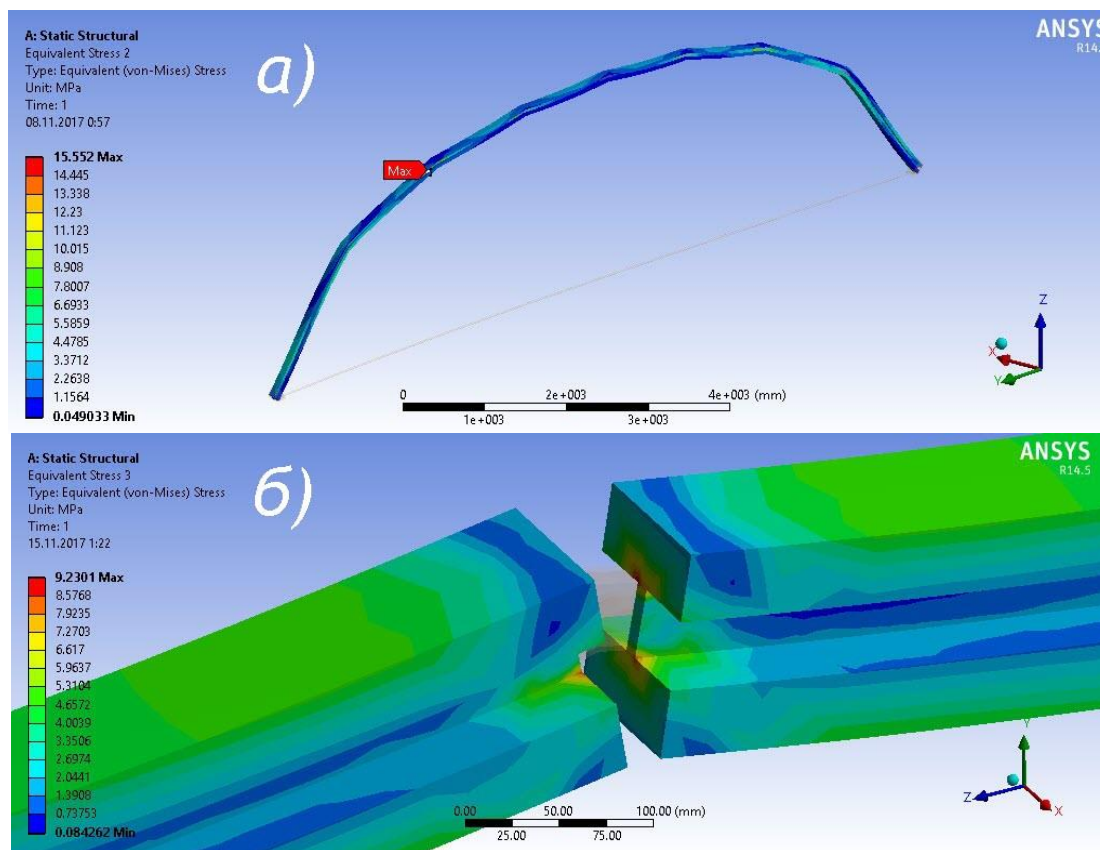


Рис. 3. Изополя эквивалентных напряжений в деревянных элементах арочной конструкции пролетом 12 м: а – по всей конструкции; б – в наиболее нагруженном узле

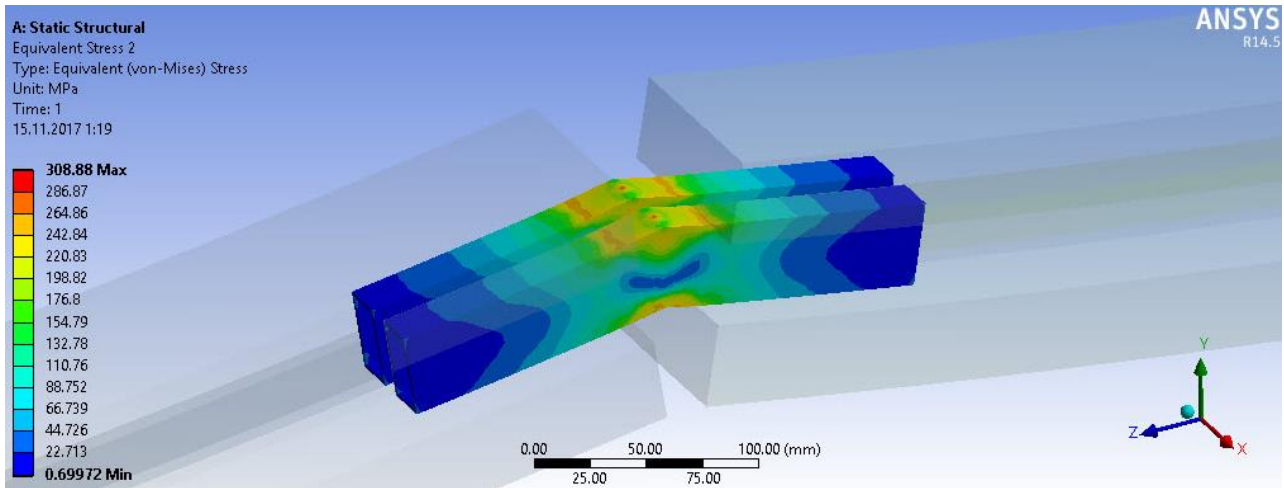


Рис. 4. Изополя эквивалентных напряжений в стальных элементах конструкции

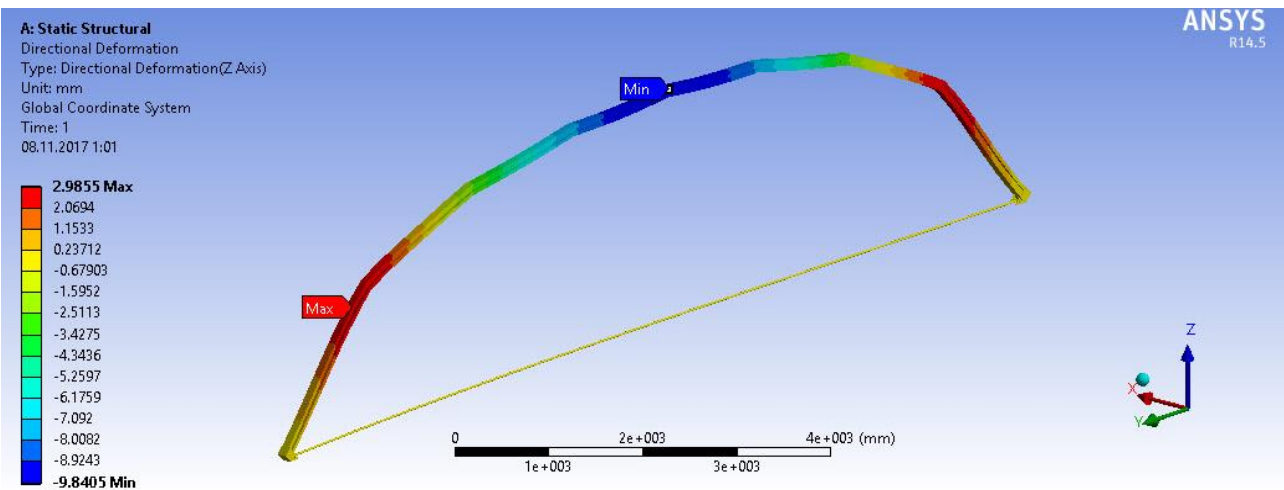


Рис. 5. Изополя перемещений в арочной конструкции пролетом 12 м

Для повышения прочности стенки из OSB и исключения их хрупкого разрушения стенки были усилены тонкими металлическими сетками.

Выводы. Проведенные теоретические, аналитические и численные исследования показали возможность применения ДДБ со стенкой из OSB в конструкциях покрытий не только прямолинейного, но и различных полигональных очертаний.

Расчеты показали приемлемые коэффициенты запаса таких конструкций. Для определения действительного напряженно-деформированного состояния рассматриваемой конструкции в лаборатории кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций ОГАСА ведутся экспериментальные исследования моделей сводчатых полигональных конструкций.

Список использованных источников

1. Деревянные двутавровые балки с торцевыми узлами для устройства полигональных сводов покрытия 12...18 м [Текст] / В. В. Стоянов, О. М. Коршак, А. В. Бойко, А. В. Чучмай // Современные строительные конструкции из металла и древесины. – 2017. – №1. – С. 56–62.
2. Торцевий вузол двотаврових дерев'яних балок [Текст]: заявка 5043/3А/17 / Стоянов В. В., Бойко А. В. – № 201701663; заявл. 21.02.2017.
3. Стоянов, В. В. Двутаврові балки з дерев'яними поясами і стінкою з OSB [Текст] / В. В. Стоянов, О. М. Коршак // Деревообробник. – 2009. – №6. – С. 17–30.
4. Мартинец, Д. В. Клееные деревянные конструкции [Текст] / Д. В. Мартинец. – М.: Картограф, 1975. – 52 с.
5. Ломакин, А. Д. Клееные деревянные конструкции в сельскохозяйственных зданиях [Текст] / А. Д. Ломакин, Д. В. Мартинец. – М.: Стройиздат, 1982. – 103 с.
6. Кузнецов, И. Л. Облегченные конструкции арочных зданий (исследование, разработка, внедрение) [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Кузнецов Иван Леонидович. – Казань, 1995. – 310 с.
7. Rachera, P. Effect of web stiffness on the bending behaviour of timber composite I-beams [Text] / P. Rachera, J. Vocquetb, A. Bouchaira // Materials & Design. – 2007. – С. 844–849.

Бойко Олексій Віталійович, аспірант кафедри металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (050) 516-60-00. E-mail: boikoolv@gmail.com.

Стоянов Володимир Васильович, д-р техн. наук, професор кафедри металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (067) 707-23-82. E-mail: mdipk@ukr.net.

Бояджі Андрій Олександрович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (096) 695-55-10. E-mail: mdipk4@gmail.com.

Коршак Ольга Михайлівна, канд. техн. наук, доцент кафедри металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (067) 481-74-07. E-mail: bagiraolga@ukr.net.

Чучмай Сергій Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедри металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (096) 819-14-29. E-mail: mdipk@ukr.net.

Boyko Oleksiy, postgraduate student of the department of metal, wooden and plastic structures of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (093) 677-73-35. E-mail: boikoolv@gmail.com.

Stoyanov Vladimir, doctor of technical sciences, professor of the department of metal, wooden and plastic structures of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (067) 707-23-82. E-mail: mdipk@ukr.net.

Boiadzhi Andrii, Ph.D., senior lecturer of the department of metal, wooden and plastic structures of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (096) 695-55-10. E-mail: mdipk4@gmail.com.

Korshak Olga, Ph.D., associate professor of the department of metal, wooden and plastic constructions of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (067) 481-74-07. E-mail: bagiraolga@ukr.net.

Chuchmay Sergey, Ph.D., associate professor, department of metal, wooden and plastic structures of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (096) 819-14-29. E-mail: mdipk@ukr.net.

Стаття прийнята 15.12.2017 р.

УДК 624.074

РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТРУКТУРНО-ВАНТОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Доктори техн. наук Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко,
канд. техн. наук Г. М. Гасій (ПолтНТУ)

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРНО-ВАНТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Доктора техн. наук Л. И. Стороженко, Д. А. Ермоленко,
канд. техн. наук Г. М. Гасий (ПолтНТУ)

CALCULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF CABLE SPACE FRAMES

Dr. of techn. sciences L. I. Storozhenko, D. A. Yermolenko,
cand. of techn. sciences G. M. Gasii

Наведено методику розрахунку напружено-деформованого стану нових комбінованих конструкцій – структурно-вантових покриттів. Розглядається конструкція аркового типу, конструктивна схема якої складається із плоских жорстких дисків та вантових елементів. Математична модель розрахунку враховує геометричну нелінійність такої системи шляхом побудови її деформованого стану із урахуванням деформацій вантових конструктивних елементів. Заміна просторової схеми структурно-вантової конструкції аркового типу плоскою комбінованою системою спростила отримання компонентів визначальних співвідношень.

Ключові слова: диск, проліт, вант, шарнір, сталезалізобетон.

Приведена методика расчета напряженно-деформированного состояния новых комбинированных конструкций – структурно-вантовых покрытий. Рассматривается конструкция арочного типа, конструктивная схема которой состоит из плоских жестких дисков и вантовых элементов. Математическая модель расчета учитывает геометрическую нелинейность такой системы путем построения ее деформированного состояния с учетом деформаций вантовых конструктивных элементов. Замена пространственной схемы структурно-вантовой конструкции арочного типа плоской комбинированной системой упростила получение компонентов определяющих соотношений.

Ключевые слова: диск, пролет, вант, шарнир, сталежелезобетон.

The article presents the calculation of stress-strain state of the cable space frame that consists of space modular elements and flexible rods of the lower belt, which are connected with bolts. The cable space frame is double-layer roof system, consisting of spatial modules, connected to each other via bolted joints. The shaping of the structure is made through the flexible elements of the bottom chord, which are manufactured as cables. Taking into account the fact that the cable space frame is a completely new type of structure with the original design, the investigation of the stress-strain state of individual elements of the structure is a pressing issue. Therefore, the purpose of the work is to determine the specifics of the behavior and study the stress-strain state of cable space frame. The construction of an arched type a constructive scheme of which consists of flat hard drives and cable elements is considered. The mathematical model of calculation takes into account the geometric nonlinearity of such system.

Keywords: disk, fly, cable, hinge, steel reinforced concrete.

Вступ. Просторова структурно-вантова конструкція має оригінальне рішення, яке реалізує принципи раціонального використання матеріалів, а також модульності складових елементів [1–3]. На сьогодні просторові структурно-вантові конструкції вже ґрунтовно досліджені [4–7]. Установлена їх техніко-економічна перевага порівняно з традиційними рішеннями [8–10]. Запропоновані конструкції є ефективними системами, що мають просту будову й технологію. Конструктивні особливості структурно-вантових покриттів детально розглянуті в [11], однак слід зазначити те, що такі конструкції об'єднують у собі та забезпечують сумісну роботу жорстких просторових модулів і гнучких елементів (рис. 1), що необхідно враховувати на всіх стадіях виробництва таких конструкцій, зокрема і при розрахунках. Тому дослідження особливостей роботи просторових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій під дією зовнішнього навантаження є актуальним.

Огляд останніх джерел і публікацій показав, що просторові структурно-вантові конструкції нагадують традиційні структурні конструкції [12], теорія розрахунку яких досить ґрунтовно розроблена та широко апробована [13]. В основу статичного розрахунку структурних конструкцій покладено уявлення про роботу елементів у пружній стадії. Такий підхід інколи призводить до значних перевитрат матеріалів та збільшення вартості конструкції. Тому доцільно при проектуванні великопролітних конструкцій враховувати геометричну нелінійність [14].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є розроблення методики визначення напружено-деформованого стану просторової структурно-вантової конструкції для можливості раціонального їх проектування. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити два завдання:

– обрати розрахункову схему структурно-вантової конструкції лінійного типу при дії вертикального навантаження;

– розробити математичну модель розрахунку на основі складених визначальних співвідношень з урахуванням особливостей деформування вантових елементів структурно-вантової конструкції.

Основний матеріал і результати. Застосування просторових структурно-вантових конструкцій у будівлях та спорудах універсального призначення потребує розроблення математичного апарату розрахунку.

Основним складовим елементом структурно-вантових конструкцій є просторовий модуль тетраїдної форми у вигляді просторового плитно-стрижневого елемента [15]. Із просторових модулів складаються аркові конструкції лінійного типу (рис. 1). У свою чергу лінійні елементи утворюють просторову циліндричну конструкцію покриття.

Основними геометричними параметрами лінійних елементів є проліт L та стріла підйому f . Зазначені параметри є головними у формоутворенні запропонованих конструкцій, зокрема визначають їх геометрію. Зовнішня форма просторових структурно-вантових конструкцій задається окресленням верхнього поясу. При цьому ординати поздовжньої осі встановлюються за рівняннями кривих, а сама вісь проходить через центри верхніх шарнірів. Положення останніх у вертикальній площині встановлюється від початку координат у центрі лівої опори арки по дузі, що складає частину кола або еліпса, або параболи другого ступеня.

Система, що розглядається, має у своєму складі вантові елементи. Особливістю останніх як конструктивних елементів є те, що при малих деформаціях окремих тросів переміщення всієї системи стають відносно великими. Крім того, у вантових елементах є неприпустимим виникнення зусилля стиску. Тому структурно-вантові системи з механічної точки зору варто віднести до геометрично нелінійних.

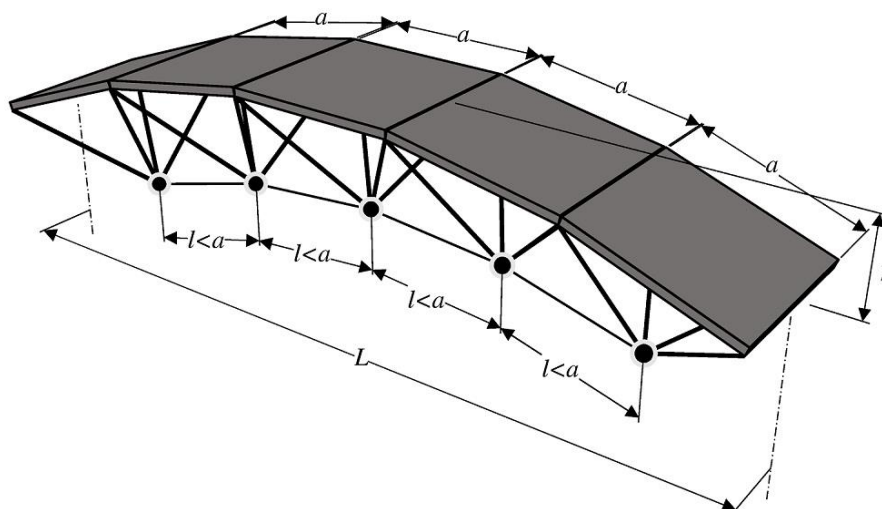


Рис. 1. Просторова структурно-вантова конструкція аркового типу

Дискретна модель структурно-вантової конструкції подана шарнірною стрижневою системою із жорсткими блоками. Як жорсткі блоки виступають модулі тетраїдної форми.

Поєднання елементів різних типів у єдину комбіновану систему відбувається через з'єднання у вигляді ідеального шарніра. Зовнішні зусилля вважаємо прикладеними строго у площині отриманої плоскої комбінованої системи. Кріплення цієї системи відбувається через шарнірні

опори: з одного боку – рухому, з другого – нерухому.

На дію вертикального навантаження структурно-вантова конструкція у вигляді лінійного елемента розглядається як плоска. Окремі модулі замінюємо рамними трикутними елементами (рис. 2). Гнучкі елементи замінено стрижнями. Така заміна є обґрунтованою, тому що розглядаються системи із геометрією, яка не призводить до появи стискаючих зусиль у гнучких елементах.

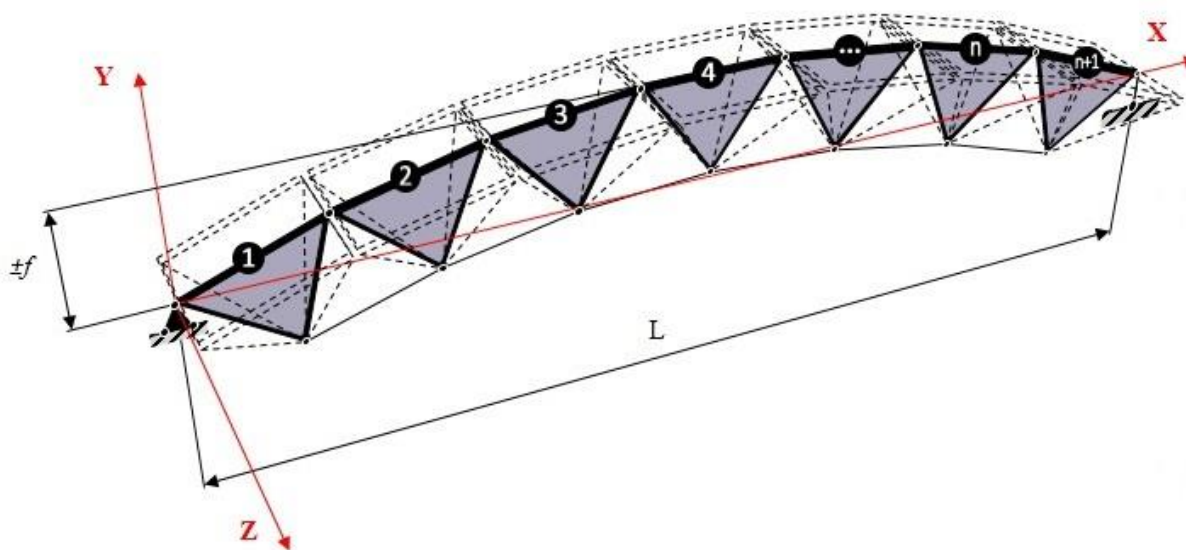


Рис. 2. Перехід від просторової геометричної схеми структурно-вантової конструкції до плоскої моделі

Загальний вигляд геометричної схеми плоскої структурно-вантової комбінованої системи наведено на рис. 3.

Модель лінійного елемента подана кінцевим числом n жорстких трикутних елементів (рис. 4, в), m гнучких елементів

(рис. 4, г), i вузлів між жорсткими елементами у вигляді простих шарнірів (рис. 4, а) та j вузлів у вигляді кратних шарнірів (рис. 4, б). При цьому $n = \{1, 2, \dots\}$; $m = \{A, B, \dots\}$; $i = \{I, II, \dots\}$; $j = \{a, b, \dots\}$.

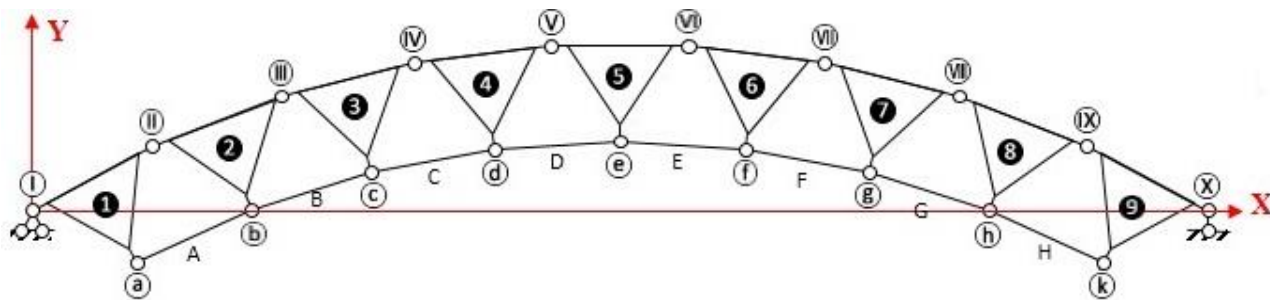


Рис. 3. Геометрична схема структурно-вантової конструкції

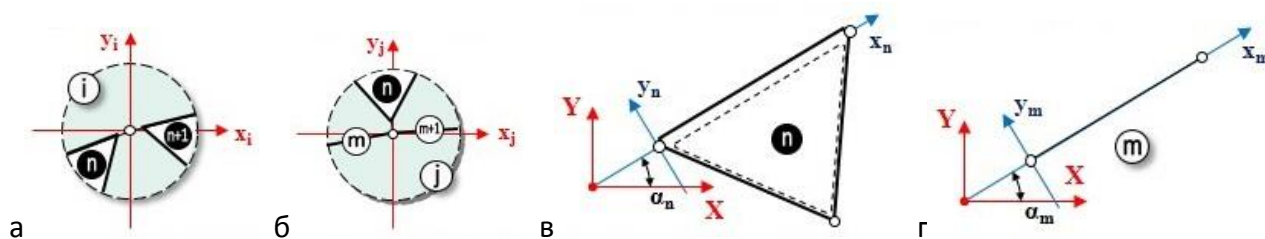


Рис. 4. Моделі елементів геометричної схеми:

а – вузли верхнього поясу; б – вузли нижнього поясу;
в – жорсткі трикутні елементи; г – гнучкі елементи

З кінематичного погляду положення жорстких вставок плоскої структурно-вантової системи як плоских фігур визначається трьома параметрами (x, y, φ). Тому вони мають три ступені вільності. Стрижні, що з'єднують плоскі фігури в реальній конструкції, працюють виключно на осьове навантаження. Таким чином, утворюється

статично визначена система, у якій диски мають три точки з'єднання (шарніри), а стрижні (гнучкі елементи) – дві. Зовнішні зусилля приведено до вузлових і прикладено у місцях з'єднання жорстких трикутних елементів на верхній стороні конструкції.

Рівняння рівноваги складаються для деформованого стану системи (рис. 5).

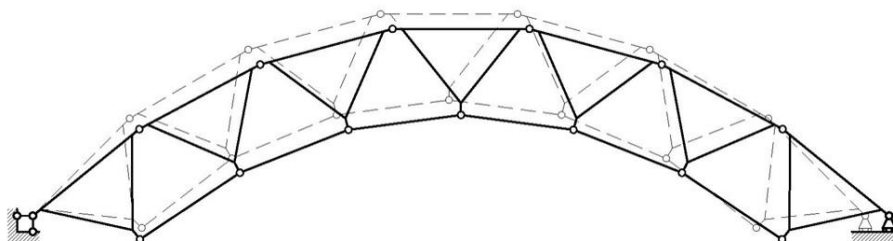


Рис. 5. Деформована схема структурно-вантової конструкції лінійного типу

Тобто матриця рівнянь рівноваги $[A]$ буде залежати від вектора переміщень $\{u\}$. Тоді рівняння рівноваги для нелінійної системи структурно-вантової конструкції лінійного типу будуть такими:

$$[A] \{S\} = \{F\}. \quad (1)$$

Нелінійний вигляд будуть мати і геометричні рівняння, що пов'язують деформації елементів системи із переміщеннями ключових точок:

$$\{\Delta\} = [A]^T \{u\}. \quad (2)$$

При цьому вектор деформацій $\{\Delta\}$ повинен задовольняти обмеження – ванти можуть працювати лише на розтяг:

$$\{\Delta\} \geq \{0\}. \quad (3)$$

Для побудови математичної моделі розрахунку структурно-вантової конструкції скористаємось екстремальним принципом про максимум додаткової роботи зовнішніх сил для кінематично допустимого вектора переміщень. З урахуванням (2) та (3) цей принцип має такий математичний вираз:

$$\begin{aligned} & (\{F\}^T - (1/2) \{\Delta\}^T [K] \{\Delta\}) \rightarrow \max; \\ & \{\Delta\} = [A] \{u\}; \\ & \{\Delta\} \geq \{0\}, \end{aligned} \quad (4)$$

де $[K]$ – матриця жорсткості системи.

Окремий жорсткий трикутний елемент n перебуває під дією зусиль (рис. 6, а) $\{S_i^n\} \equiv (N_i)^T$, $\{S_{i+1}^n\} \equiv (N_{i+1})^T$ та $\{S_j^n\} \equiv (N_j^m, N_j^{m+1})^T$. А окремий елемент m перебуває під дією зусиль $\{S_j^m\} \equiv (N_j^m)^T$, $\{S_{j+1}^m\} \equiv (N_{j+1}^m)^T$.

Вектор зусиль усієї моделі лінійного елемента складається з векторів зусиль окремих елементів і має загальний вигляд $\{S\} \equiv (\{N\})^T$.

Визначальні співвідношення розрахунку. Напружений стан n -го елемента (рис. 6, а) описується поздовжніми силами N_i та N_{i+1} , що діють у вузлах верхнього поясу, і поздовжніми силами N_j^m та N_j^{m+1} , що діють у нижньому шарнірі. При цьому $N_j^m = N_j^{m+1} = N^m$.

Рівняння статки складаються на основі умов рівноваги у вузлах моделі у деформованому стані. У цій системі можна виділити два типи вузлів:

– вузол типу « i » – у ньому сходяться два жорстких трикутних елементи типу « n »;

– вузол типу « j » – у ньому сходяться один жорсткий трикутний елемент типу « n » та два гнучких елементи типу « m ».

Розглянемо вузол типу « i » (рис. 6, а). На вузол діє зовнішнє навантаження $\{F_i\} \equiv (F_{xi}, F_{yi})^T$, а також зусилля $\{S^n\} \equiv (N_i^n)^T$ та $\{S^{n+1}\} \equiv (N_{i+1}^n)^T$.

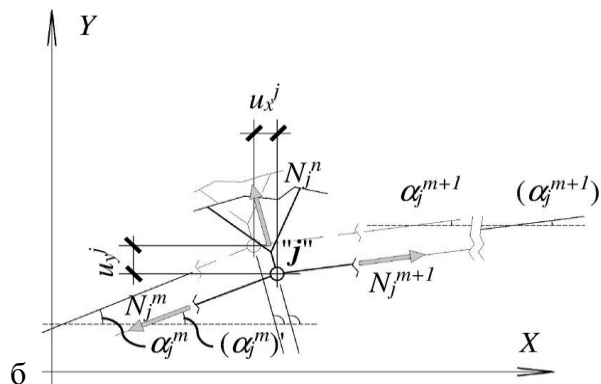
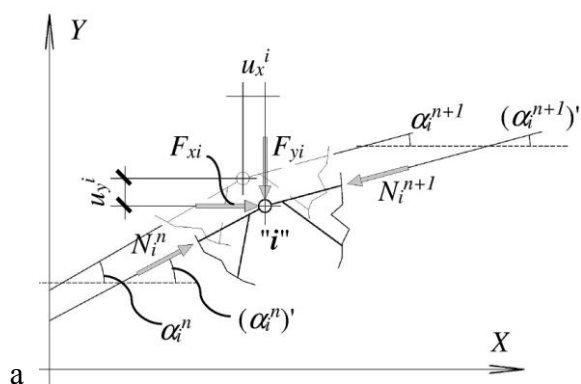


Рис. 6. Зусилля в елементах системи:
а – вузол верхнього поясу; б – вузол нижнього поясу

У випадку плоскої системи зовнішніх та внутрішніх сил можна скласти такі рівняння рівноваги:

$$-N_i^n \cdot \cos(\alpha_n)' + N_i^{n+1} \cdot \cos(\alpha_{n+1})' = F_{yi}; \quad (5)$$

$$N_i^n \cdot \sin(\alpha_n)' - N_i^{n+1} \cdot \sin(\alpha_{n+1})' = F_{xi}. \quad (6)$$

Отримуємо значення косинусів та синусів (рис. 7, а):

$$\cos(\alpha_n)' = \frac{x_i - x_{i-1} + u_x^i - u_x^{i-1}}{l_o^n}; \quad \sin(\alpha_n)' = \frac{y_i - y_{i-1} - u_y^i + u_y^{i-1}}{l_o^n}; \quad (7)$$

$$\cos(\alpha_{n+1})' = \frac{x_{i+1} - x_i + u_x^{i+1} - u_x^i}{l_o^{n+1}}; \quad \sin(\alpha_{n+1})' = \frac{y_{i+1} - y_i - u_y^{i+1} + u_y^i}{l_o^{n+1}}, \quad (8)$$

де l_o^n та l_o^{n+1} – початкова довжина жорстких блоків між вузлами верхнього поясу. При цьому $l_o^n = l_o^{n+1} = \text{const}$.

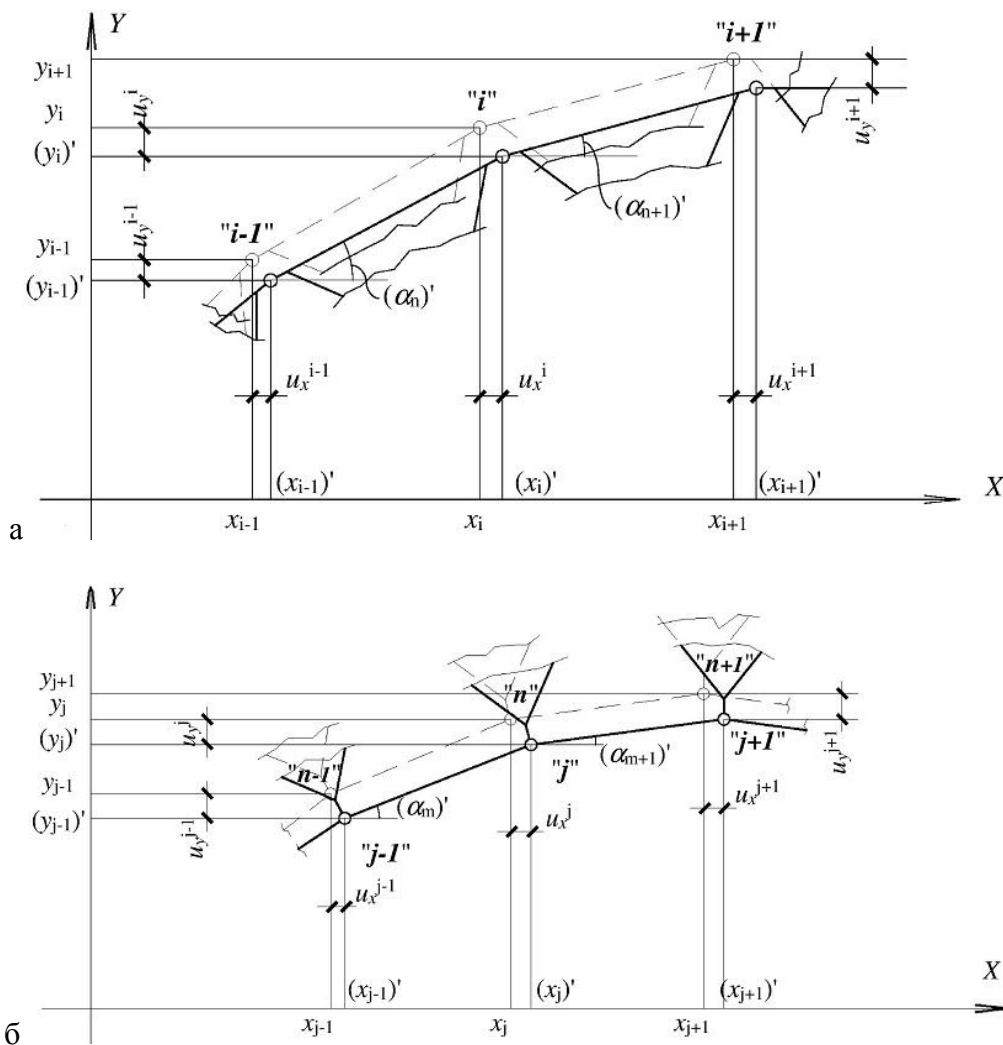


Рис. 7. Деформований стан елементів верхнього (а) та нижнього (б) поясу

Тоді матриця компонентів рівняння (1) для вузлів верхнього поясу буде мати такий вигляд:

$$[A_i] = \begin{bmatrix} -\frac{(x_i - x_{i-1} + u_x^i - u_x^{i-1})}{l_o^n} & \frac{x_{i+1} - x_i + u_x^{i+1} - u_x^i}{l_o^n} \\ \frac{y_i - y_{i-1} - u_y^i + u_y^{i-1}}{l_o^n} & -\frac{(y_{i+1} - y_i - u_y^{i+1} + u_y^i)}{l_o^n} \end{bmatrix}$$

Розглянемо вузол типу «j» (рис. 6, б). На вузол не діє зовнішнє навантаження, але діють зусилля $\{S^m\} \equiv (N_j^m)^T$, $\{S^{m+1}\} \equiv (N_j^{m+1})^T$ та $\{S^n\} \equiv (N_i^n)^T$.

У випадку плоскої системи зовнішніх та внутрішніх сил можна скласти такі рівняння рівноваги:

$$N_j^m \cdot \cos(\alpha_j^{m+1})' - N_j^n \cdot \sin(\alpha_j^n)' - N_j^m \cdot \cos(\alpha_j^m)' = 0; \quad (9)$$

$$N_j^{m+1} \cdot \sin(\alpha_j^{m+1})' + N_j^n \cdot \cos(\alpha_j^n)' - N_j^m \cdot \sin(\alpha_j^m)' = 0. \quad (10)$$

Отримуємо значення косинусів та синусів (рис. 7, б):

$$\cos(\alpha_j^m)' = \frac{x_j - x_{j-1} + u_x^j - u_x^{j-1}}{(l_o^m)'}; \quad \sin(\alpha_j^m)' = \frac{y_j - y_{j-1} - u_y^j + u_y^{j-1}}{(l_o^m)'}; \quad (11)$$

$$\cos(\alpha_j^{m+1})' = \frac{x_{j+1} - x_j + u_x^{j+1} - u_x^j}{(l_o^{m+1})'}; \quad \sin(\alpha_j^{m+1})' = \frac{y_{j+1} - y_j - u_y^{j+1} + u_y^j}{(l_o^{m+1})'}, \quad (12)$$

де

$$(l_o^m)' = l_o^m + \Delta^m = \sqrt{(x_j - x_{j-1} + u_x^j - u_x^{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1} - u_y^j + u_y^{j-1})^2};$$

$$(l_o^{m+1})' = l_o^{m+1} + \Delta^{m+1} = \sqrt{(x_{j+1} - x_j + u_x^{j+1} - u_x^j)^2 + (y_{j+1} - y_j - u_y^{j+1} + u_y^j)^2}.$$

$$\cos(\alpha_j^n)' = \frac{x_j + u_x^j - \frac{1}{2}(x_i + x_{i+1} + u_x^i + u_x^{i+1})}{h^n}; \quad \sin(\alpha_j^n)' = \frac{y_j - u_y^j - \frac{1}{2}(y_i + y_{i+1} - u_y^i - u_y^{i+1})}{h^n}; \quad (13)$$

де h^n – висота модуля.

Тоді матриця компонентів рівняння (2) для вузлів нижнього поясу буде мати такий вигляд:

$$A_j] \equiv \begin{array}{|c|c|c|} \hline \frac{x_{j+1} - x_j + u_x^{j+1} - u_x^j}{(l_o^{m+1})'} & - \frac{x_j + u_x^j - \frac{1}{2}(x_i + x_{i+1} + u_x^i + u_x^{i+1})}{h^n} & - \frac{x_j - x_{j-1} + u_x^j - u_x^{j-1}}{(l_o^m)'} \\ \hline \frac{y_{j+1} - y_j - u_y^{j+1} + u_y^j}{(l_o^{m+1})'} & \frac{y_j - u_y^j - \frac{1}{2}(y_i + y_{i+1} - u_y^i - u_y^{i+1})}{h^n} & - \frac{y_j - y_{j-1} - u_y^j + u_y^{j-1}}{(l_o^m)'} \\ \hline \end{array}$$

Вигляд матриці рівняння сумісності деформацій та переміщень отримано на підставі геометричного дослідження

деформованої схеми (рис. 7). Довжина деформованого вантового елемента визначається з залежності

$$(l_o^m + \Delta^m)^2 = [(x_j - x_{j-1}) + (u_x^j - u_x^{j-1})]^2 + [(y_j - y_{j-1}) + (u_y^j - u_y^{j-1})]^2.$$

Беручи до уваги, що $(l_o^m)^2 = (x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2$, а $\Delta^m \ll 2l_o^m$, тоді деформація вантового елемента визначається так:

$$\Delta^m = \frac{2(x_j - x_{j-1}) + (u_x^j - u_x^{j-1})}{2l_o^m} u_x^j - \frac{2(x_j - x_{j-1}) + (u_x^j - u_x^{j-1})}{2l_o^m} u_x^{j-1} + \frac{-2(y_j - y_{j-1}) + (u_y^j - u_y^{j-1})}{2l_o^m} u_y^j - \frac{-2(y_j - y_{j-1}) + (u_y^j - u_y^{j-1})}{2l_o^m} u_y^{j-1}.$$

Тоді матриця компонентів рівняння (2) для вантів буде мати такий вигляд:

$$[\bar{A}_m]^T \equiv \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \frac{2(x_j - x_{j-1}) + (u_x^j - u_x^{j-1})}{2l_o^m} & - \frac{2(x_j - x_{j-1}) + (u_x^j - u_x^{j-1})}{2l_o^m} & \frac{-2(y_j - y_{j-1}) + (u_y^j - u_y^{j-1})}{2l_o^m} & - \frac{-2(y_j - y_{j-1}) + (u_y^j - u_y^{j-1})}{2l_o^m} \\ \hline \end{array}$$

А вектор переміщень

$$\{u\}_m \equiv (u_x^{j-1}; u_x^j; u_y^{j-1}; u_y^j).$$

Так як розглядається випадок, коли у вантах не можуть виникати стискаючі зусилля і тому не виникають відповідні деформації, тоді система визначальних рівнянь буде мати остаточний вигляд:

$$[A] \{S\} = \{F\};$$

$$\{\Delta\} = [\bar{A}]^T \{u\}; \quad (14)$$

$$[K] \{\Delta\} = \{N\}.$$

Розв'язання цієї системи рівнянь дає змогу отримати компоненти напружено-деформованого стану структурно-вантових конструкцій аркового типу за умови завантаження їх у вузлах верхнього поясу зосередженим навантаженням.

Висновки. За результатами проведеного дослідження було розроблено методику розрахунку напружено-деформованого стану нових комбінованих конструкцій – просторових структурно-вантових покриттів, суть якого полягає в умовному приведенні проектованої конструкції до плоскої системи, яка складається з жорстких дисків. Відповідно до поставлених задач дослідження зроблено нижченаведені висновки:

1. Заміна просторової схеми структурно-вантової конструкції аркового типу у вигляді плоскої комбінованої системи значно спрощує аналіз її поведінки

під дією зовнішнього навантаження, приведеного до вузлового. Запропонована схема є геометрично незмінною і статично визначеною.

2. У результаті розв'язання задачі встановлюється напружено-деформований стан окремими елементами структурно-вантових конструкцій лінійного типу, що дає змогу виконати підбір несучих елементів модулів тетраїдної форми та гнучких елементів, а також установити межі раціонального застосування структурно-вантових конструкцій як покриття будівель та споруд універсального призначення.

Список використаних джерел

1. Стороженко, Л. І. Просторові сталезалізобетонні структурно-вантові покриття [Текст]: монографія / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій, С. А. Гапченко. – Полтава: АСМІ, 2015. – 218 с.
2. Gasii, G. M. Connections systems of the composite cable space frame [Text] / G. M. Gasii // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 5–10.
3. Gasii, G. M. Types of steel and concrete composite cable space frames [Text] / G. M. Gasii // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2016. – № 6 (66). – P. 158–165. DOI: 10.15802/stp2016/90514.
4. Гасій, Г. М. Скінченно-елементний аналіз НДС вузла з'єднання елементів верхнього пояса структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції [Текст] / Г. М. Гасій // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 171. – С. 69–76.
5. Експериментальне дослідження моделей структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції [Текст] / Л. І. Стороженко, Д. А. Єрмоленко, Г. М. Гасій, Ю.Л. Гладченко // Зб. наук. праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – № 3 (33). – С. 243–249.
6. Стороженко, Л. І. Визначення переміщень вузлів просторової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції експериментальним шляхом [Текст] / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 169. – С.118–128.
7. Стороженко, Л. І. Експериментальне дослідження деформативності окремих несучих елементів сталезалізобетонного структурно-вантового покриття [Текст] / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научных трудов. – Днепропетровск, 2015. – № 82. – С. 219–225.
8. Gasii, G. Estimate of technical and economic benefits of a new space composite structure [Text] / G. Gasii, O. Hasii, O. Zabolotskyi // MATEC Web of Conferences. – 2017. – № 116. DOI:10.1051/matecconf/201711602014.
9. Gasii, G. M. Comparative characteristics of the spatial grid-cable steel-concrete composite slab [Text] / G. M. Gasii // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 2016. – № 844. – С. 260–265.
10. Стороженко, Л. И. Особенности конструкции и технологии монтажа новых пространственных сталежелезобетонных структурно-вантовых покрытий [Текст] /

Л. И. Стороженко, Г. М. Гасий, С. А. Гапченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1 (70). – Т. 4. – С. 67–72. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.26041.

11. Стороженко, Л. І. Просторове сталезалізобетонне структурно-вантове покриття [Текст] / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научных трудов. – Днепропетровск, 2015. – № 82. – С. 226–230.

12. Трофимов, В. И. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений [Текст] : монография / В. И. Трофимов, А. М. Каминский. – М.: АСВ, 2002. – 573 с.

13. Канчели, Н. В. Строительные пространственные конструкции [Текст]: учеб. пособие / Н. В. Канчели. – М.: АСВ, 2009. – 112 с.

14. Шимановский, А. В. Теория и расчет сильнонелинейных конструкций [Текст] / А. В. Шимановский, В. К. Цихановский. – К.: Сталь, 2005. – 432 с.

15. Стороженко, Л. І. Великопролітні структурно-вантові сталезалізобетонні покриття для будівель і споруд аеропортів [Текст] / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Проблеми розвитку міського середовища. – 2016. – № 2 (16). – С. 72–79.

Стороженко Леонід Іванович, д-р техн. наук, професор, професор кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Срмоленко Дмитро Адольфович, д-р техн. наук, доцент, професор кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Гасій Григорій Михайлович, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Storozhenko Leonid Ivanovych – D.Sc, Professor, Professor of Department of Structures from metal, wood and plastics. Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.

Yermolenko Dmytro Adolfovyeh – D.Sc, Associate Professor, Professor of Department of Structures from metal, wood and plastics. Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.

Grygorii Gasii – Ph.D., Associate Professor, Doctoral candidate of Department of Structures from metal, wood and plastics. Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University.

Стаття прийнята 15.12.2017 р.

УДК 629.424.9

ЗАСТОСУВАННЯ СИНТЕТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ЯК ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ В ОЛИВНИХ ФІЛЬТРАХ ТЕПЛОВИЗНИХ ДИЗЕЛІВ

Асп. О. В. Буцький

ПРИМЕНЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В КАЧЕСТВЕ ФИЛЬТРУЮЩИХ В МАСЛЯНЫХ ФИЛЬТРАХ ТЕПЛОВИЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Асп. А. В. Буцкий

APPLICATION OF SYNTHETIC MATERIALS IN QUALITY OF FILTERING IN OIL FILTERS OF HEATING DIESELS

Postgraduate A. Butskiy

У статті порушено питання і проведено аналіз експериментальних даних щодо можливості застосування синтетичного пористо-волокнистого поліпропілену як фільтрувального матеріалу замість наявних. Порушено теоретичні питання фільтрації, показників роботи фільтрувальних елементів, а також зроблено висновки щодо

можливості застосування синтетичного пористо-волокнистого поліпропілену як фільтрувального матеріалу в повнопотокових оливних фільтрах.

Ключові слова: олива, фільтр, очищення, синтетичний, матеріал, фільтрація, повнопотоковий.

В статье затронуты вопросы и проведен анализ экспериментальных данных относительно возможности применения синтетического пористо-волокнистого полипропилена в качестве фильтрующего материала вместо имеющихся. Нарушены теоретические вопросы фильтрации, показателей работы фильтрующих элементов, а также сделаны выводы о возможности применения синтетического пористо-волокнистого полипропилена в качестве фильтрующего материала в полнопоточных масляных фильтрах.

Ключевые слова: масло, фильтр, очистка, синтетический, материал, фильтрация, полнопоточный.

In our time, domestic filtering elements are used in domestic diesel locomotives in oil filters full of current filtration. Having a fairly negative experience in the exploitation of such filter materials, namely, reducing their reliability with an increase in the time of their work, in some cases the complete lack of filtration due to their impulses led to the emergence of questions about their replacement. The rapid development of the production of synthetic materials, which are now widespread in various fields of engineering, have led to the idea of the possibility of application, some of them as filtering. The article deals with the questions and analyzes of experimental data on the possibility of using synthetic porous-fiber polypropylene as a filter material in full current oil filters. The questions of theoretical questions of filtration, indicators of the work of filtering elements are presented, as well as the conclusions made regarding the possibility of using synthetic porous-fiber polypropylene as a filter material in full current oil filters.

Key words: oil, filter, purification, synthetic, material, filtration, full flow.

Вступ. Останнім часом приділяється велика увага питанням вдосконалення дизельних двигунів. Перш за все це пов'язано з підвищенням показників потужності, застосуванням високого турбонаддуву. Згадане обґрунтовує підвищення вимог до вузлів тертя в дизелях. Забезпечення надійної, безвідмовної роботи двигунів, забезпечення їх необхідного ресурсу досягається застосуванням олив з високими експлуатаційними властивостями, а також завдяки підтримці цих властивостей в процесі експлуатації. Відомо, що в процесі роботи дизелів олива забруднюється домішками, частинками абразивного зносу тощо.

Для підвищення захисту пар тертя необхідно підвищувати ефективність очищення олив завдяки застосуванню нових фільтрувальних матеріалів, вдосконалення конструкцій фільтрів і очищувачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв'язанню проблем підвищення ефективності очищення олив присвячені роботи таких учених: Альошина В. І., Григор'єва М. А. [2], Венцеля С. В., Квашніна Б. С., Солодова Д. Ф. [4, 5], Жужикова В. А., Морозова Г. А. та ін. У роботах цих учених були порушені питання фільтрації олив, теоретичні та експериментальні дослідження в галузі підвищення ефективності очищення олив. У працях Морозова Г. А., Григор'єва М. А. було показано, що при ефективній фільтрації оливи не тільки знижується знос і кількість відкладень, але й подовжується термін служби дизельної оливи, окрім того було встановлено, що нерозчинні домішки в оливі розмірами 1-2 мкм не здійснюють помітного абразивного впливу. Вивчення складу нерозчинних домішок, закономір-

ностей накопичення їх у оливі та розробка методів фільтрації були відображені в працях Беяніна П. М. та Морозова Г. А [1, 3]. Однак у працях згаданих учених не порушувалось питання заміни паперових фільтруючих елементів у фільтрах тонкої очистки оливи на більш досконалі.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою проведення дослідження є встановлення можливості застосування синтетичних пористих матеріалів як фільтрувальних матеріалів на підставі отриманих експериментальних даних. Завданнями дослідження є проведення практичного експерименту, обробка отриманих експериментальних даних для оцінки можливості застосування синтетичних матеріалів як фільтрувальних.

Основна частина дослідження. Основною причиною передчасної відмови деталей і вузлів дизелів магістральних тепловозів є їх абразивний знос частинками забруднень, які неминуче потрапляють до його оливної системи. Для запобігання цьому до оливної системи в обов'язковому порядку вводиться пристрій, який називається фільтром. Він призначений для затримки частинок, що забруднюють, і в такий спосіб покращує роботу дизеля [9].

Однією з найважливіших характеристик фільтра разом з тонкістю фільтрації, пропускною спроможністю і гідравлічним опором фільтроелемента (ФЕ) є термін його служби між очищеннями або його заміни [3]. Цей термін визначається інтенсивністю забивання пор ФЕ частинками забруднювача (в даному випадку продуктами забруднення дизельної оливи) і зниженням його пропускної здатності. Згадане, в разі потреби підтримки постійної витрати оливи через фільтр, призводить до збільшення перепаду тиску на ФЕ. Зростання перепаду тиску є непрямим показником забрудненості ФЕ і при досягненні деякого критичного значення він взагалі перестає працювати. Олива за такої умови починає циркулювати в обхід нього за допомогою спеціального

пропускного клапана. Тому відрізок часу між початком роботи фільтра і моментом відкриття перепускного клапана називається терміном служби (ресурсом) ФЕ [3].

Відповідно до теорії фільтрації [2] робота ФЕ може протікати за одним з типових законів:

- згідно із законом фільтрації з утворенням осаду;
- згідно із законом фільтрації з повною закупоркою пор;
- за проміжним законом;
- за стандартним законом фільтрації.

Як правило, всі ФЕ, які встановлюються на тепловозах, працюють за першими трьома законами.

Основним законом фільтрації є закон Дарсі, який встановлює, що швидкість фільтрації прямо пропорційна градієнту перепаду тисків, обернено пропорційна до в'язкості й залежить від деякого коефіцієнта, що називається проникністю.

Для плоскої перегородки, що фільтрує, закон Дарсі визначається

$$v_{\phi} = z \frac{\Delta p}{\delta \eta}, \text{ см/с}, \quad (1)$$

де v_{ϕ} – швидкість фільтрації, см/с;

z – проникність, см²;

Δp – перепад тисків, г/с²·см;

η – динамічна в'язкість рідини, г/см·с;

δ – товщина перегородки, що фільтрує, см.

Фільтрування з утворенням осаду математично характеризується рівнянням (2), що виражає залежність між часом фільтрування й обсягом забрудненої рідини, яка пройшла через пористе середовище (тіло).

$$0,5k_1q = \frac{t}{q} - \frac{1}{v_0}, \quad (2)$$

де q – обсяг фільтрату з одиниці поверхні фільтрування, $\text{см}^3/\text{см}^2$;

t – час фільтрування, с;

$v_0 = \frac{dq}{dt}$ – швидкість фільтрування в початковий момент, $\text{см}/\text{с}$;

$k_1 = \frac{dR}{dq}$ – коефіцієнт, що враховує зміну опору фільтруючої перегородки.

Фільтрування за проміжним законом характеризується тим, що утворення осаду із твердих часток суспензії відбувається в порах і над входом до порових каналів. Процес фільтрування за цим законом описується рівнянням

$$k_2 t = \frac{1}{v} - \frac{1}{v_0}, \quad (3)$$

де v – середня швидкість рідини, яка фільтрується, до моменту часу t .

Причому зміну опору плинину рідини, що фільтрується, через пористе середовище (тіло) у цьому випадку визначено дослідним шляхом

$$k_2 R = \frac{dR}{dq}. \quad (4)$$

Комбінована система фільтрації оливи, що нині застосовується на тепловозах, складається з повнопотокових фільтрів тонкого очищення, фільтра грубої очистки і частково потокових фільтрів відцентрової очистки оливи, дозволяє ефективно затримувати частки бруду і в такий спосіб продовжувати термін служби пар тертя в дизелях.

На тепловозах 2ТЕ116 і ТЕП70, що експлуатуються на залізницях України, для тонкої очистки оливи застосовували в повнопотокових фільтрах тонкого очищення фільтрувальні елементи "Нарва-6" [6]. Основним їх постачальником була Естонська РСР. З розпадом СРСР виникла потреба виготовлення в Україні

таких фільтрувальних елементів. На підприємствах України було організовано виробництво цих елементів, які й встановлюються нині на тепловози. Однак надійність таких елементів різко знизилася. Через неякісний фільтрувальний папір масово збільшилися розриви гофрованих фільтрувальних шторок в експлуатації, які призводять до повної втрати фільтрувальних властивостей повнопотокового фільтра, роботи дизеля на брудній оливі і, як наслідок, до підвищення бракувальних параметрів оливи.

Зважаючи на згадане, для заміни елементів "Нарва-6" був запропонований принципово новий пористий фільтрувальний елемент, виготовлений на основі синтетичного матеріалу волокнистого поліпропілену [7, 12] (ФЕПВ). Він має ті самі габаритні розміри, що і елемент "Нарва-6", проте відрізняється значною товщиною фільтрувальної шторки (до 30 мм). Порівняльні характеристики ФЕ "Нарва-6" і ФЕПВ наведені в табл. 1.

Дослідна експлуатація партії ФЕПВ була розпочата на тепловозі 2ТЕ116 в локомотивному депо Основа Південної залізниці і показала позитивні результати. Після пробігу 38345 км ФЕ були зняті і зважені. Приріст забруднень на ФЕ за цей пробіг склав від 300 до 500 г. Однак проведення випробувань довелося зупинити через серйозну поломку дизеля і тривалий його ремонт.

Розглянувши отримані результати, було прийнято рішення розпочати проведення випробувань спочатку, але встановити ФЕПВ на інший тепловоз.

Для проведення випробувань був обраний тепловоз ТЕП70-115, на який при проведенні йому ТО-3 і були встановлені вісім фільтрувальних елементів ФЕПВ.

Слід зазначити, що оливна система тепловоза ТЕП70 має свої відмінні риси. У ній є два контури циркуляції оливи (рис. 1) замість одного, як це зроблено на інших типах тепловозів.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики ФЕ "Нарва-6" і ФЕПВ

Найменування параметра	"Нарва-6"	ФЕПВ
Номинальна пропускна здатність при в'язкості 30 сСт і $t_m = 75^{\circ}\text{C}$, м ³ /год	6,5	7,5
Товщина фільтрувальної шторки, мм	0,6	30
Номинальна тонкість фільтрації, мкм	43	25
Перепад тиску, що викликає руйнування ФЕ, не менше, кгс/см ²	3	3
Фільтрувальний матеріал	папір ДРКБ-45	поліпропілен
Перепад тиску на ФЕ, кгс/см ²	0,06	0,07
Гранична температура оливи, що фільтрується, °С	100	100
Фільтрація	поверхнева	об'ємна

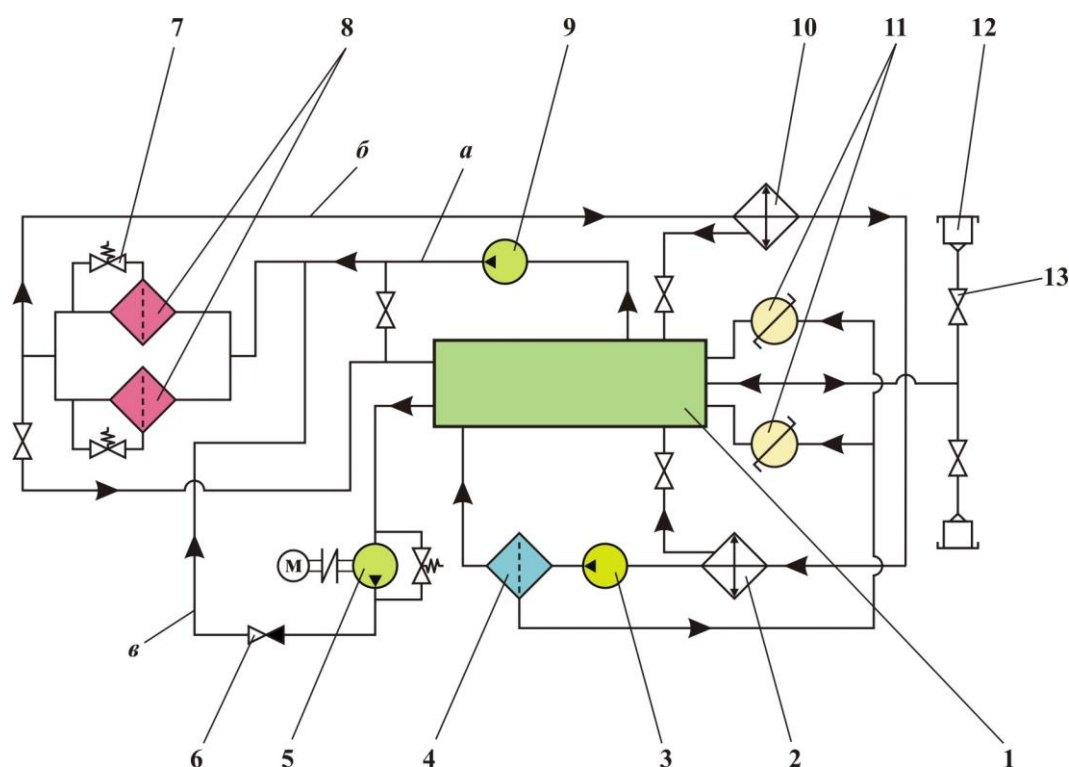


Рис. 1. Гідралічна схема оливної системи тепловоза ТЕР70:

1 – дизель; 2, 10 – оливоохолоджувачі; 3, 9 – оливні насоси; 4 – фільтр грубого очищення; 5 – оливопрокачувальний агрегат; 6 – безповоротний клапан; 7 – перепускний клапан; 8 – двосекційний повнопотоковий фільтр тонкого очищення оливи; 11 – відцентровий очищувач; 12 – заправна горловина; 13 – вентиль

Оскільки на дизелі цього тепловоза встановлені два оливних насоси, то перший контур утворений одним з них – 9, який забирає оливу з картера дизеля і подає його

на двосекційний повнопотоковий фільтр тонкого очищення оливи 8. Після фільтра очищена олива проходить в оливоохолоджувачі 10, 2 і надходить у

другий контур, який утворений насосом 3 і фільтром грубого очищення оливи 4. Якщо на всіх тепловозах фільтр грубої очистки оливи завжди встановлюється до фільтра тонкого очищення, то на тепловозі ТЕП70 він стоїть після нього. Зроблено це з такою метою: якщо повнопотоковий фільтр буде забитий і олива піде в його обхід, то фільтр грубої очистки оливи 4 все одно в якійсь мірі буде проводити його очищення.

Необхідно зазначити, що технічний стан дизеля тепловоза погіршується зі збільшенням пробігу тепловоза, а також залежить від якості поточних ремонтів тепловоза, наявності необхідних запасних частин, спеціалізованих стендів і кваліфікованих фахівців. У зв'язку з економічними труднощами технічний стан дизелів тепловозного парку нашої країни знаходиться на низькому рівні: витрата оливи на чад більше 1,8 % від витрати палива, низький тиск наддуву, нещільності циліндро-поршневої групи, не

відрегульована паливна апаратура. Все це призводить до того, що близько 90 % всіх замін оливи з ФЕ "Нарва-6" пов'язано з його забрудненням.

Лабораторні аналізи, які проводилися періодично, показали, що при використанні ФЕПВ досягнуто збереження як його щільності по ходу фільтрації оливи, так і пористості зовнішнього шару. Все це дозволило досягнути пофракційного утримання часток забруднень. Крім того, в процесі фільтрації на зовнішній поверхні ФЕПВ утворювався більш пухкий шар утриманих частинок забруднень, що і сприяв менш інтенсивному наростанню гідравлічного опору при роботі і більшому терміну його служби до заміни.

Для виявлення ступеня забрудненості ФЕПВ була розроблена спеціальна методика. Її результатом стала універсальна номограма, що дозволяє оцінювати працездатність повнопотокового фільтра з ФЕПВ (рис. 2).

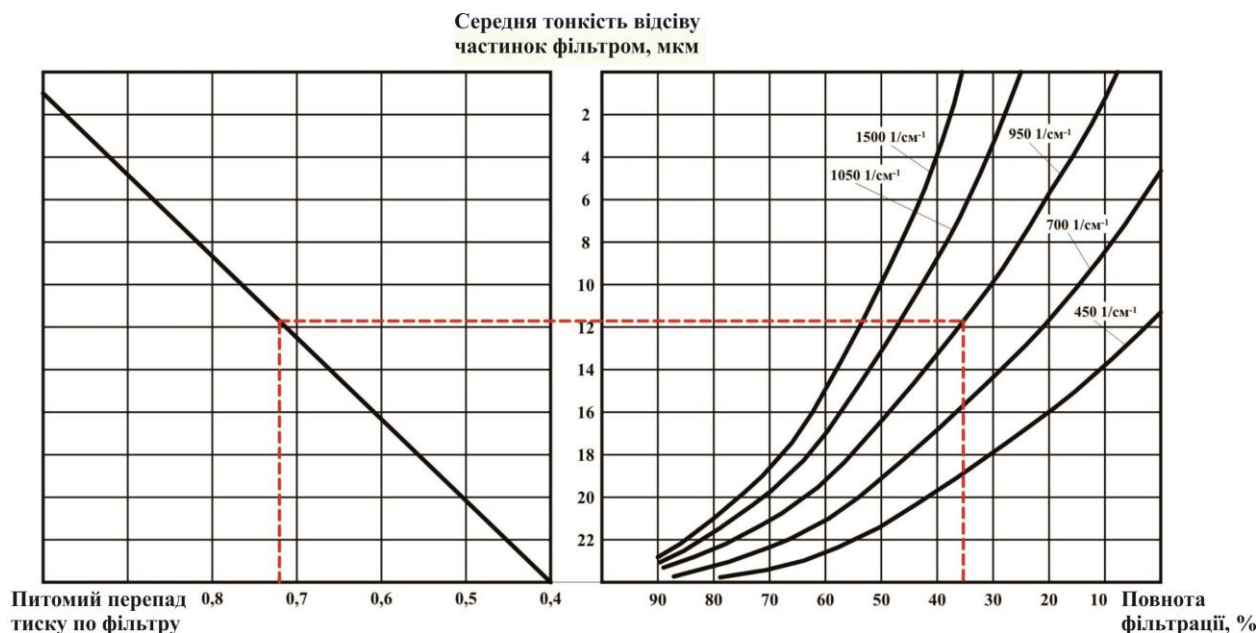


Рис. 2. Номограма для оцінки працездатності повнопотокових фільтрів з ФЕПВ

Основним вихідним параметром даної номограми є питомий перепад тиску по фільтру. Він визначається як відношення дійсного абсолютного значення перепаду

по повнопотоковому фільтру до його нормованого технічною документацією значення. Як приклад на номограмі показано: якщо питомий перепад тиску по

фільтру становитиме 0,73, то з цієї точки відновлюємо перпендикуляр до прямої лінії, а від неї в горизонтальному напрямку до відповідної кривої забрудненості масла (за даними лабораторного аналізу). Якщо за даними лабораторного аналізу забрудненість (оптична щільність) склала 950 l/cm^{-1} , то з точки перетину з нею горизонтальної прямої опускаємо перпендикуляр вниз і отримуємо значення

35 %. Це означає, що даний повнопотоковий фільтр ще має запас за своєю брудоемністю в межах 35 %. Крім того, з номограми видно, що даний фільтр на даний момент часу має середню тонкість відсіву частинок в межах 11,5 мкм.

Етапи проведення експлуатаційних випробувань ФЕПВ на тепловозі ТЕП70-115 характеризувалися параметрами, які наведені у табл. 2 та рис. 3, 4.

Таблиця 2

Параметри етапів проведення експлуатаційних матеріалів

Вид технічного обслуговування	ТО-3	ТО-3	ТР-1	Заміна мастила	ТО-3	ТО-3	ТО-3	ТО-3	ТО-3
Пробіг локомотива, км	1068	20143	30616	30616	39756	49044	59915	70147	80560
Перепад тиску, кг/см^2	0,9	0,95	1	0,9	0,95	1,05	1,2	1,35	1,5
Забрудненість, l/cm^{-1}	943,1	1347	1221	316	327	412	483	695	985
В'язкість, сСт	16,36	16,4	13,62	13,5	13,44	14,38	14,65	15,2	16,5

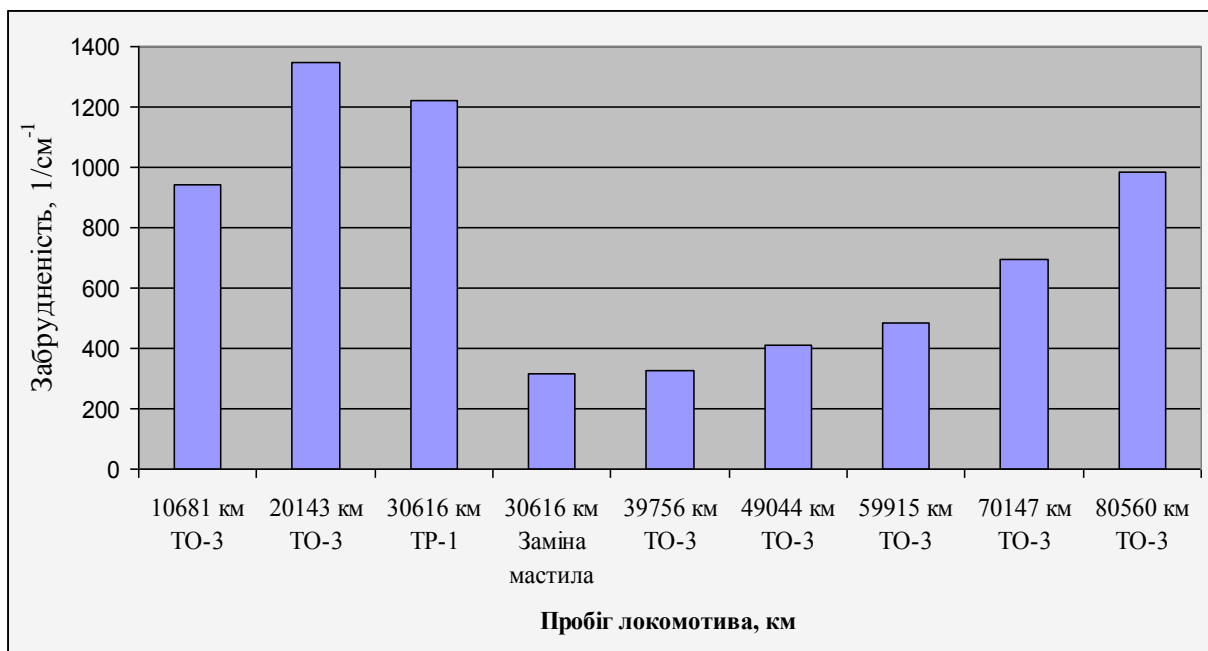


Рис. 3. Залежність забрудненості моторної оливи від пробігу локомотива

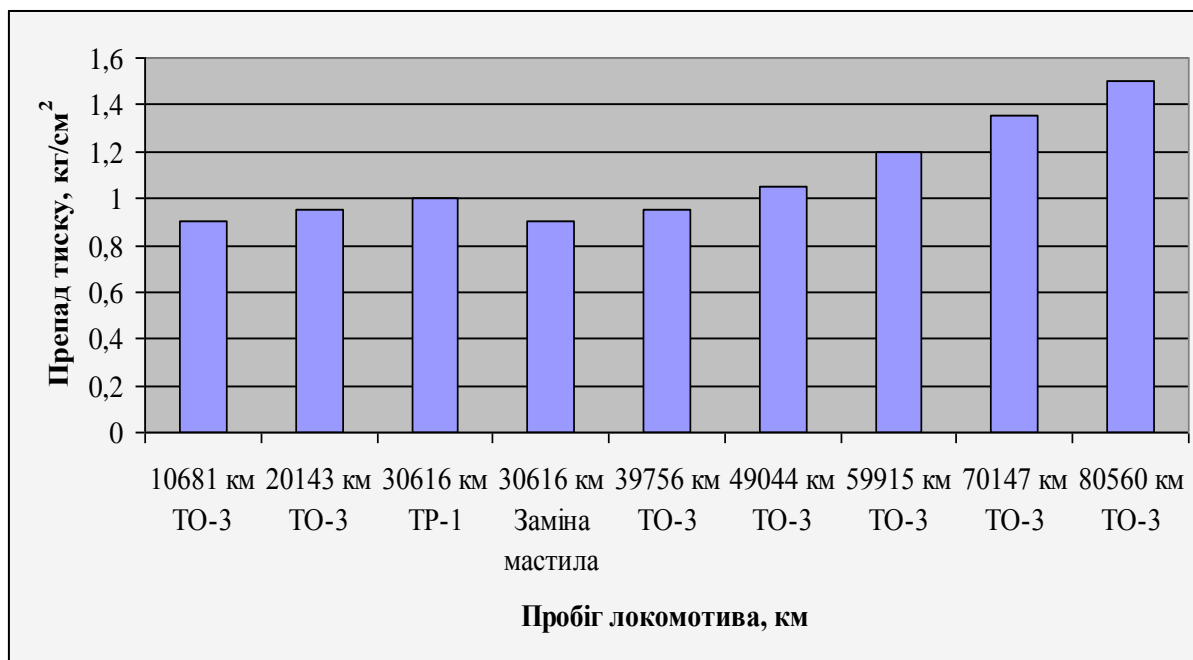


Рис. 4. Залежність перепаду тиску фільтрувального елемента від пробігу локомотива

Висновки. В ході проведення експерименту, обробки експериментальних даних було визначено, що запропоновані фільтрувальні елементи на основі волокнисто-пористого пропілену зарекомендували себе як такі, що забезпечують ефективну очистку моторної оливи (номінальна тонкість відсіву 25 мкм), окрім цього, такі фільтрувальні елементи мають мінімальний гідравлічний опір при різних швидкостях фільтрації з одночасним збереженням необхідної тонкості відсіву.

З погляду надійності безвідмовної роботи фільтрувальних елементів з

волокнисто-пористого пропілену у порівнянні з елементами «Нарва-6» елементи ФЕПВ володіють достатньою стійкістю і механічною міцністю при впливі вібраційних і теплових навантажень. За своїми конструктивними характеристиками фільтрувальні елементи ФЕПВ придатні до заміни наявних елементів при проведенні технічного обслуговування чи поточних ремонтів тепловозів без додаткових конструктивних змін оливних систем.

Список використаних джерел

1. Беянин, П. М. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем [Текст] / П. М. Беянин Ж. С. Черненко. – М.: Машиностроение, 1964. – 284 с.
2. Григорьев, М. А. Очистка масла и топлива в автотракторных двигателях [Текст] / М. А. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1970. – 270 с.
3. Морозов, Г. А. Очистка масла в дизелях [Текст] / Г. А. Морозов, О. М. Арцимов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 352 с.
4. Кучин, Г. П. Некоторые вопросы создания новых фильтров для тонко очистки масла в дизелях [Текст] / Г. П. Кучин Д. Ф. Солодов // Труды семинара по очистке воздуха, масла и топлива с целью увеличения долговечности двигателей. – М.: НАМИ, 1966. – № 7. – С. 25-30.

5. Исследование бумажных фильтрующих материалов для тонкой очистки масла [Текст] / Д. Ф. Солодов // Применение топлив и масел в дизелях: сборник ЦНИДИ № 52. – М.: Машиностроение, 1966. – № 52. – С. 68-74.
6. Пассажирский тепловоз ТЭП70 [Текст] / В. Г. Быков, Б. Н. Морошкин, Г. Е. Серделевич [и др.]. – М.: Транспорт, 1976. – 232 с.
7. ТУ У 29.2-31061660-002:2011 Елементи фільтрувальні синтетичні поліпропіленово-волоконні. Технічні умови [Текст] . – К.: Держстандарт України, 2011. – 25 с.
8. Das D. Comosite Nonwoven Materials. Structure, Properties and Applications [Text] / D. Das, B. Pourdeyhimi. – Woodhead Publishing Limited, 2004. – 233 p.
9. Sutherland K. Filters and filtration (Fifth Edition) [Text] / K. Sutherland. – Elsevier Ltd, 2007. – 523 p.
10. Xin Q Diesel engine system design [Text] / Q.Xin – Woodhead Publishing Limited, 2011. – 1038 p.
- 11 Irwin M. Hutten Handbook of nonwoven filter media (second edition) [Text] / Irwin M. Hutten – Elsevier Ltd., 2015. – 650 p.
12. Friedrich K. Multifunctionality of polymer composites [Text] / K. Friedrich, U. Breuer – Elsevier Inc, 2015. – 964 p.
- 13 Svarovsky L. Solid-liquid separation (fourth edition) [Text] / L. Svarovsky – Elsevier Ltd, 2001. – 554 p.

Буцький Олександр В'ячеславович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (066) 439-22-73.

Butskiy Alexander Vyacheslavovich, graduate student of Maintenance and repair of rolling stock., Ukrainian state university of railway transport Tel: (066) 439-22-73.

Стаття прийнята 18.12.2017 р.

УДК 629.4.048.7

ПУТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Асп. Э. В. Белошицкий, науч. сотр. С. С. Мямлин (ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна)

ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОПАЛЕННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

Асп. Е. В. Білошицький, наук. співроб. С. С. Мямлін (ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна)

WAYS TO IMPROVE SYSTEMS OF WATER HEATING SYSTEMS OF PASSENGER WAGONS

Postgraduate E. V. Biloshytskyi, researcher S. S. Myamlin

В статье рассмотрены варианты решения научно-прикладной задачи по усовершенствованию систем отопления пассажирских вагонов с целью повышения их эффективности. Предложены и рассмотрены технические решения по увеличению скорости естественной циркуляции, увеличению теплопередающей поверхности отопительных труб за счет изменения формы их сечения. Применение результатов данного

исследования позволит в целом повысить эксплуатационные характеристики системы отопления пассажирских вагонов.

Ключевые слова: отопление пассажирских вагонов, естественная циркуляция, теплоотдача.

У статті розглянуто варіанти вирішення науково-прикладної задачі щодо вдосконалення систем опалення пасажирських вагонів з метою підвищення їх ефективності. Запропоновано та розглянуто технічні рішення із збільшення швидкості природної циркуляції, збільшення теплопередаючої поверхні обігрівальних труб за рахунок зміни форми їх перетину. Застосування результатів даного дослідження дозволить в цілому підвищити експлуатаційні характеристики системи опалення пасажирських вагонів.

Ключові слова: опалення пасажирських вагонів, природна циркуляція, тепловіддача.

In the article the variants of solving the scientific and applied problem are considered for improvement of carriages heating systems in order to increase their efficiency. Mathematically modeled operation of the heating system on the basis of the received data, developed proposals to improve the efficiency of the heating system. Proposed and discussed technical solutions to increase the rate of natural circulation, this makes it possible to avoid the use of a circulation pump. Increase of the heat transfer surface of the heating pipes by changing the shape of their cross section, allows to refuse the use of finned tubes, taking into account the cost and operating costs of finned pipes, use flat oval tubes economically feasible. The proposed solutions significantly simplify the design of the heating system, as well as its service in the operation of passenger cars.

Applying the results of this study will improve the overall performance of the heating system and the comfort of a passenger car. The proposed technical solutions can be used not only for the construction of new wagons, but also to modernize the heating systems in the cars of the operating park under depot conditions.

Keywords: heating of passenger cars, natural circulation, heat transfer.

Введение. Пассажирские перевозки являются одним из основных видов деятельности железнодорожного транспорта. При этом пассажирский подвижной состав является важной составляющей этого вида услуг, который должен обеспечивать не только безопасность движения, но и такие показатели, как «ездовой комфорт» и «комфортабельность». Ездовой комфорт характеризует динамические качества вагона исходя из условий физиологического воздействия ускорений и частот колебаний пассажирского вагона на организм человека. Проблемам повышения ездового комфорта посвящены научные труды различных исследователей [1]. Комфортабельность пассажирского вагона принято рассматривать как единство конструкции кузова, планировки, дизайна и внутреннего

оборудования, предназначенного для улучшения условий проезда пассажиров. Обеспечение комфортных условий при перевозке пассажиров является необходимым требованием к пассажирскому подвижному составу. Создание параметров микроклимата в пассажирском вагоне, как известно, осуществляется несколькими системами, в том числе и системой отопления, которая должна обеспечивать стабильный подогрев воздуха в вагонах в холодное время года. Но существующие системы отопления обладают некоторыми недостатками, которые снижают эффективность систем отопления. Поэтому совершенствование эффективности систем отопления пассажирских вагонов представляет собой актуальную научно-прикладную задачу для железнодорожного транспорта.

Изучению вопросов обеспечения комфортных условий перевозки пассажиров на железнодорожном транспорте посвящен целый ряд научных исследований [2-4]. Усовершенствование систем отопления пассажирских вагонов рассмотрено в монографиях и статьях [5-9]. Однако не в полной мере раскрыты резервы улучшения функционирования систем отопления. Поэтому авторами данной работы предлагается несколько иной подход к повышению эффективности систем отопления пассажирских вагонов.

На большинстве выпускаемых и эксплуатируемых пассажирских вагонов в качестве основной используется водяная система отопления. Водяной система называется потому, что теплоносителем служит вода. Наиболее распространённым типом водяной системы отопления является система с верхней разводкой труб, рассчитанная на естественную циркуляцию воды. Главное достоинство такой отопительной системы – ее высокая надежность и простота эксплуатации. Следует отметить, что системы с естественной циркуляцией теплоносителя относятся к саморегулирующимся.

Вместе с тем в вагонах с отопительной установкой с верхней разводкой труб наблюдается низкая скорость естественной циркуляции воды, что снижает теплоотдачу отопительных приборов. В системах водяного отопления пассажирских вагонов в качестве обогревательных приборов пассажирских помещений применяются гладкие стальные трубы. Периодически применяются оребренные трубы, которые из-за недостаточного качества конструкции и изготовления (размеры высоты и шага ребер, плотность их соединения с трубой и т. п.) не дают ожидаемого эффекта, при сильных морозах отмечается недостаточно устойчивый температурный режим в вагонах.

Анализ последних исследований и публикаций. Системы отопления пассажирских вагонов имеют два принципиаль-

ных недостатка [10]. Первый состоит в практической невозможности автоматизации работы с целью поддержания стабильного температурного режима в вагонах. Этот недостаток обусловлен большой тепловой инерционностью, в системе находится большая масса воды (от 700 до 900 кг), и отключением высоковольтных ТЭНов системы отопления. Причины отключения различны в движении и на стоянках с последующим нагревом, в результате чего возникают переходные режимы отопления, которые вызывают колебание температуры в пассажирских вагонах. Второй заключается в низкой скорости циркуляции воды в трубах отопления, в результате чего снижается теплоотдача отопительных приборов, которая усугубляется третьим недостатком: неравномерной теплоотдачей обогревательных труб. В порядке усовершенствования системы водяного отопления ВНИИ вагоностроения и Калининским (Тверским) вагоностроительным заводом разработана система отопления для увеличения напора и ускорения циркуляции в трубах отопления [10]. В данной системе удалена теплоизоляция с поверхности верхних подающих труб, а для увеличения теплоотдачи нижних из двух параллельных отопительных труб подведена вода к ним по отдельным стоякам. Кроме того, на стояки отопления для дополнительной теплоотдачи надеты конвекционные кожуха. Схема циркуляции воды в этой системе отопления приведена на рис. 1.

Испытания этой системы отопления на вагоне ЦМВО-66 дали положительные результаты: циркуляция воды в трубах отопления увеличилась по сравнению с серийной системой отопления на этих вагонах в 3,5 раза (для справки: скорость циркуляции в вагонах серийной постройки ЦМВО-66 составляла $1,5 \pm 0,6$ м/мин [10]), теплоотдача отопительных приборов на всех сравнимых по температурам воды в котле режимах увеличилась на 20 %.

Дополнительное увеличение теплоотдачи при включении циркуляционного насоса составляет всего 15 %. При всех преимуществах этой системы отопления есть и недостатки, а именно: снята теплоизоляция с разводящих труб, это ведет к дополнительным потерям тепла через крышу, так

как разводящие трубы установлены в потолочном пространстве, установлены конвекционные кожуха, которые будут создавать избыток тепла в малом коридоре и в туалете с некотловой стороны вагона. Система испытана еще в 1974 г., но при постройке вагонов так и не применяется.

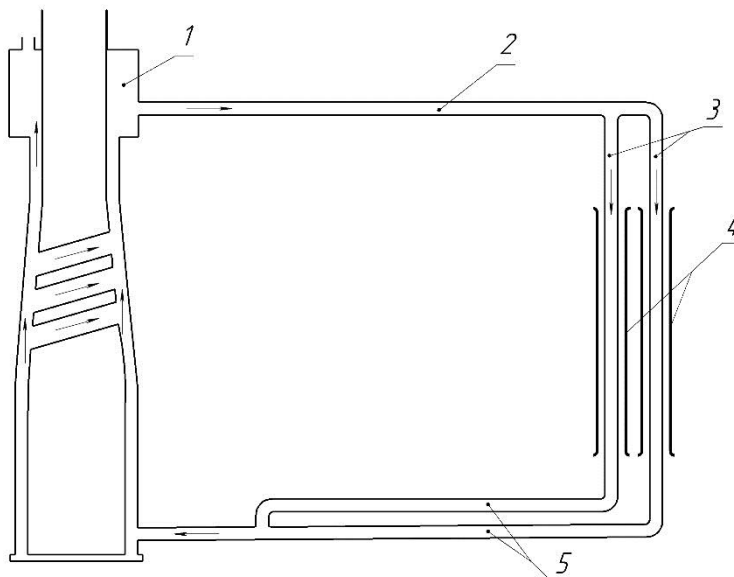


Рис. 1. Схема циркуляции воды в системе отопления:
1 – котел с расширителем; 2 – верхняя разводящая труба; 3 – стояки;
4 – конвекционные кожуха стояков; 5 – обогревательные трубы

Исследования необходимой теплопроизводительности отопительных систем [5] свидетельствуют о том, что гладкие обогревательные трубы водяной системы отопления вагонов не обеспечивают необходимой теплопроизводительности при низких температурах воздуха. Теплопроизводительность отопительных труб повышают увеличением теплопередающей поверхности отопительных труб за счёт их оребрения, важным моментом которого является обеспечение плотного контакта оребрения с трубой, если они выполнены не из одного монолита [6].

Оребрение отопительных труб должно быть рассчитано на эффективное повышение теплоотдачи при условии

равномерного распределения теплопоступлений по вагону [7].

Как видно из графика на рис. 2, применение оребренных отопительных труб увеличивает общую теплоотдачу обогревательных труб, но в исследовании автор приводит расчетные графики. Развитие теплопередающей поверхности оребрением однозначно не приводит к пропорциональному увеличению теплового потока, так как добавление ребер снижает среднее значение температуры и следовательно, уменьшает разность температуры. К недостаткам данного метода стоит отнести стоимость изготовления оребренных труб и трудности очистки ребер от осевшей пыли в процессе эксплуатации.

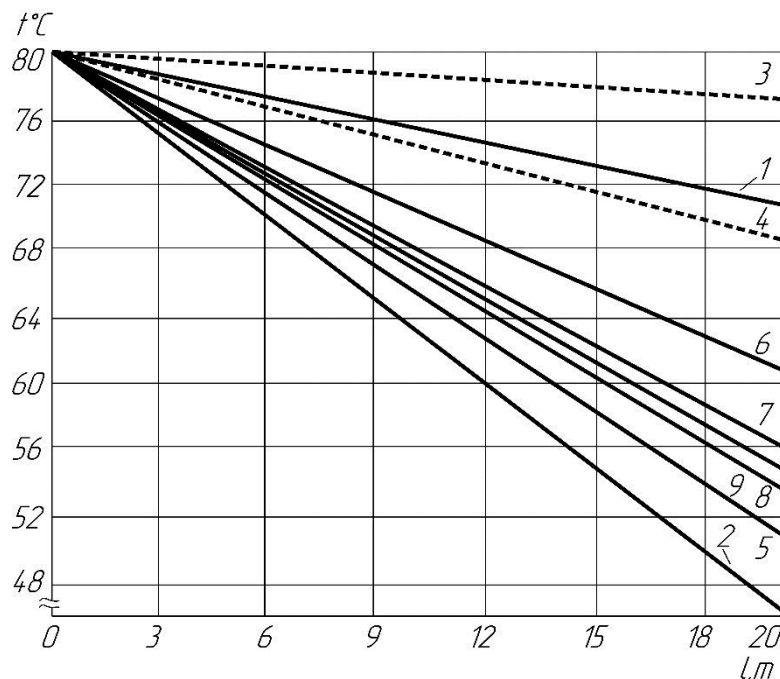


Рис. 2. Графіки змінення температури води в опалювальних трубах в залежності від їх обробки і швидкості циркуляції теплоносія:
 1 і 2 – температура води в гладкій і обробленій трубі ($K_p = 4,7$) при натуральній циркуляції; 3 і 4 – температура води в гладкій і обробленій трубі ($K_p = 4,7$) при включеному циркуляційному насосі ($W = 6$ м/мін); 5, 6, 7, 8, 9 – температура води в трубах з різним коефіцієнтом обробки, відповідно: 3,8 (75 %); 2,1 (38 %); 2,9 (52,5 %); 3,35 (63,8 %) і 3, 15 (58,1 %) при натуральній циркуляції

Для збільшення теплопередаючої поверхності також встановлюють накладні алюмінієві радіатори, які представляють собою литу конструкцію, що складається з двох половинок, скріплених між собою. Це розповсюджений спосіб збільшення теплопередаючої поверхності опалювальних труб, в основному застосовується на експлуатуємих вагонах. К недолікам цього способу можна віднести забезпечення щільного контакту радіатора з трубою, що не дозволяє досягти потрібного результату.

Визначення цілей і завдань дослідження. Метою цього дослідження є рішення науко-

прикладної задачі по підвищенню швидкості натуральної циркуляції теплоносія в системі опалення і збільшенню теплопередаючої поверхності опалювальних труб без застосування обробки. Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз формування напора в системі опалення пасажирського вагона;
- провести аналіз швидкості циркуляції теплоносія з двома стояками і стояком з збільшеною площею поперечного перерізу;
- провести аналіз швидкості циркуляції теплоносія з опалювальними трубами зміненої форми перерізу.

Основная часть исследования.

Скорость естественной циркуляции воды в системе отопления определяется из условия равенства гидравлического сопротивления S гидравлическому напору H , возникающему вследствие неравенства плотности воды в различных частях системы из-за нагревания и охлаждения теплоносителя [11]. Нагревание и охлаждение воды создает неоднородное распределение ее плотности. Постепенное охлаждение воды в разводящих трубах и стояках сменяется быстрым охлаждением в обогревательных трубах. В расчетах принято рассчитывать общее давление как сумму двух величин: давления Δp_n , образующегося вследствие охлаждения воды в отопительных

приборах, и давления Δp_{mp} , вызываемого охлаждением воды в трубах:

$$\Delta p_e = \Delta p_n + \Delta p_{mp}. \quad (1)$$

В расчетах используют среднюю величину температур, для этого вводится такое понятие как «центр охлаждения теплоносителя» и «центр нагрева теплоносителя». По разнице между этими точками и определяют гидравлический напор H . Поскольку интенсивность охлаждения зависит от скорости циркуляции, для определения этой скорости применяют метод последовательных приближений.

Рассмотрим образование напора H в системе отопления пассажирского вагона, расчетная схема которого представлена на рис 3.

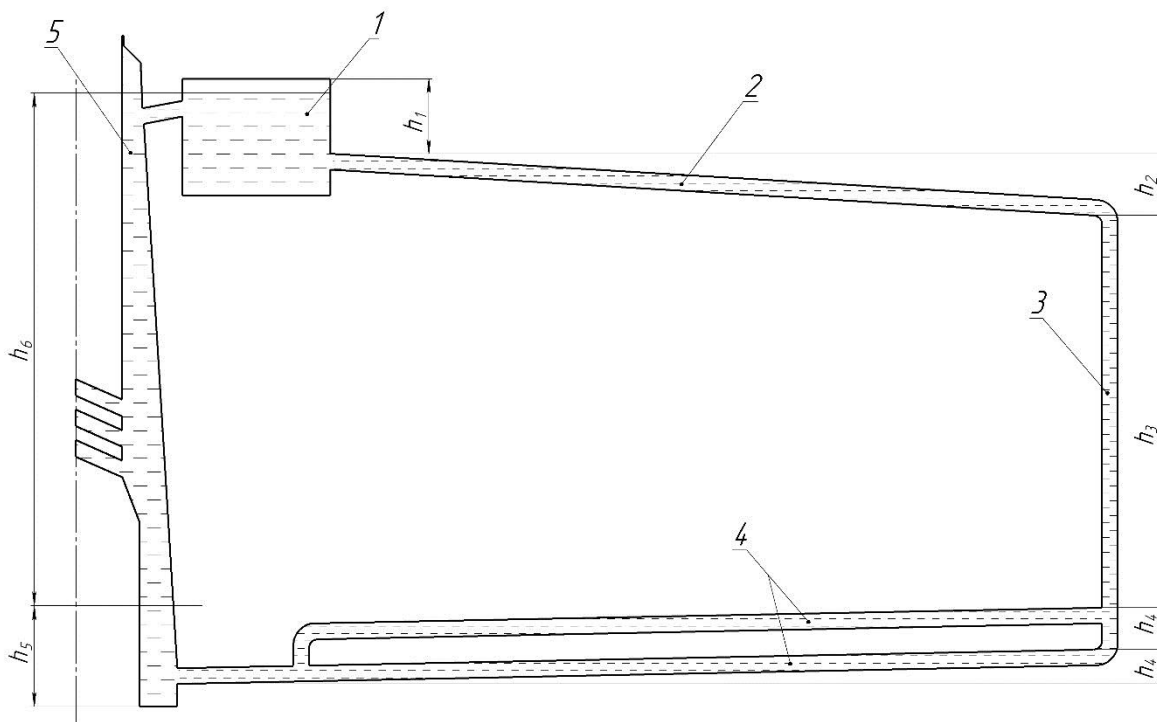


Рис. 3. Расчетная схема для определения скорости циркуляции теплоносителя в отопительной ветви системы отопления пассажирского вагона: 1 – расширительный бак; 2 – разводящая труба; 3 – стояк; 4 – обогревательные трубы; 5 – котел

Гидравлический напор в какой-либо ветви системы отопления определяется [10] так:

$$H = \sum_{i=1}^r \frac{\rho_i + \rho_i + 1}{2} h_i - \rho_0 h' - \frac{\rho_0 + \rho_k}{2} h'' , \quad (2)$$

где h' и h'' – высота столба воды в котле соответственно от центра нагрева до входа в расширитель и от входной трубы отопительного кольца до центра нагрева;

h_i – вертикальные проекции отдельных труб;

ρ_i – плотность воды.

Расчеты температуры теплоносителя в различных точках вдоль трубы производятся по формуле

$$t = t_n + (t_0 - t_n)e^{-\alpha l}, \quad (3)$$

где t – температура воды, °C;

t_n – температура воздуха около трубы, °C;

t_0 – температура воды в начале трубы, °C;

α – коэффициент теплоотдачи Вт/м²;

l – длина трубы, м.

Исходя из произвольно заданной температуры воды в трубе, примыкающей к расширителю, по формуле (3) находим температуру на выходе из этой трубы. Зная температуры на входе и выходе из трубы, по таблицам находим ее плотность. Аналогичные расчеты производят для других труб отопительного кольца. Если эти трубы разветвляются или имеют другой диаметр, то скорость циркуляции в них определяется в соответствии с данными размерами из условия непрерывности потока несжимаемой жидкости.

Определить гидравлическое сопротивление в ветви отопления можно по следующему выражению [12]

$$P = P_{\Delta} + P_m + P_p, \quad (5)$$

где P_m – потери давления в местных сопротивлениях;

P_p – потери напора на трение.

Из приведенного выше следует, что на участке высот h_4 центр охлаждения обогревательных труб ниже h_5 центра нагревания котла, следовательно, на этом участке напор образовываться не будет. На участках h_1 и h_2 разница температур теплоносителя незначительна, так как верхние разводящие трубы закрыты

теплоизоляцией, образовавшийся напор на этих участках очень незначителен. Основной напор образовывается на участке h_3 , а именно в стояке.

Малая разница температур теплоносителя в стояке и котле создает напор, который разделяется на две присоединенные к нему отопительные трубы, и его недостаточно для создания (образования) скорости теплоносителя для обеспечения равномерной теплоотдачи обогревательных труб. Конструкция вагона не позволяет установить котел ниже или поднять выше обогревательные трубы, чтобы центр нагрева теплоносителя был ниже центра охлаждения обогревательных труб.

Поскольку основной напор образовывается в стояке, рассмотрим систему отопления с двумя стояками (рис. 1), которая ранее рассмотрена в работе [10]. При этом разводящие трубы будут с теплоизоляцией, а стояки – без конвекционных кожухов. Также можно предложить увеличить массу воды в стояке путем увеличения площади поперечного сечения стояка. Таким образом, напор и скорость теплоносителя в стояке остаются такими же, как и при меньшем сечении, с учетом закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения потока возрастает скорость, то есть динамическое давление, статическое давление уменьшается.

Увеличение теплопередающей поверхности обогревательных труб за счет увеличения их диаметра повлечет снижение скорости циркуляции теплоносителя. Увеличить теплопередающую площадь обогревательных труб можно за счет изменения формы сечения с круглого на плоско-овальное (рис. 4).

При одинаковой площади проходного сечения плоско-овальная труба имеет большую длину периметра, соответственно ее площадь больше. Таким образом, меняя форму сечения, можно увеличить теплопередающую поверхность, при этом площадь проходного сечения не изменится. Но вместе с увеличением площади трубы и скорости теплоносителя увеличится гидравлическое сопротивление.

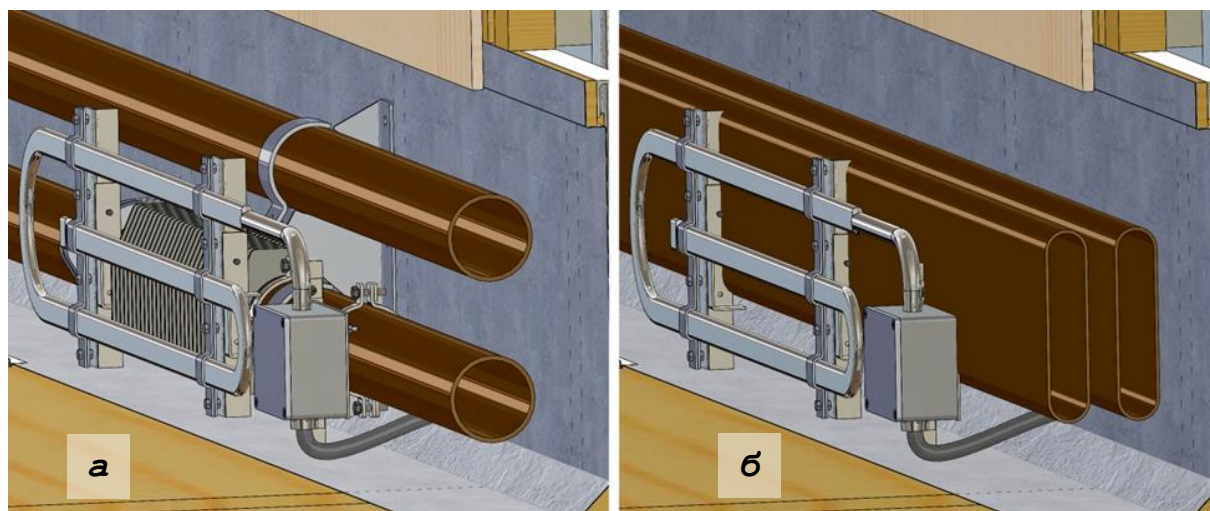


Рис. 4. Пример замены обогревательных труб:
 а – трубы с круглым сечением; б – трубы с плоско-овальным сечением

Для сравнения предложенных методов усовершенствования математически смоделирована работа отопительных ветвей системы отопления с учетом предложенных изменений. Смоделирована работа систем отопления в трех технических исполнениях:

вар. 1 – в системе все трубы разводящие, стояки и обогревательные трубы одинакового диаметра 76 мм;

вар. 2 – в системе разводящие трубы и стояки диаметром 76 мм, обогревательные трубы плоско-овального сечения;

вар. 3 – в системе разводящие трубы диаметром 76 мм, стояки диаметром 100 мм, обогревательные трубы плоско-овального сечения.

Длины труб по вариантам исполнения представлены в таблице. При моделировании были использованы следующие данные: температура воздуха в вагоне $t = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура теплоносителя в расширительном баке $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$;

высота участков, м: $h_1 = 0,36$; $h_2 = 0,2$; $h_3 = 2,1$; $h_4 = 0,2$; $h_5 = 0,68$; $h_6 = 2,11$ м.

Полученные результаты представлены на гистограмме рис. 5.

Таблица

Исходные данные параметров труб систем отопления, технических исполнений:
 вар. 1, вар. 2, вар. 3

		Диаметр, мм	Площадь проходного сечения, м ²	Длина трубы, м	Площадь трубы, м ²
Разводящие трубы	Вар.1	76	0,00385	22	5,3
	Вар.2	тоже	тоже	тоже	Тоже
	Вар.3	-//-	-//-	-//-	-//-
Стояк	Вар.1	76	0,00385	2,1	0,5
	Вар.2	76x2	0,00385x2	2,1x2	0,5x2
	Вар.3	100	0,00785	2,1	0,66
Обогревательные трубы	Вар.1	76	0,00385	20x2	9,5
	Вар.2	160x32	0,00390x2	20x2	14,4
	Вар.3	160x32	0,00390x2	20x2	14,4

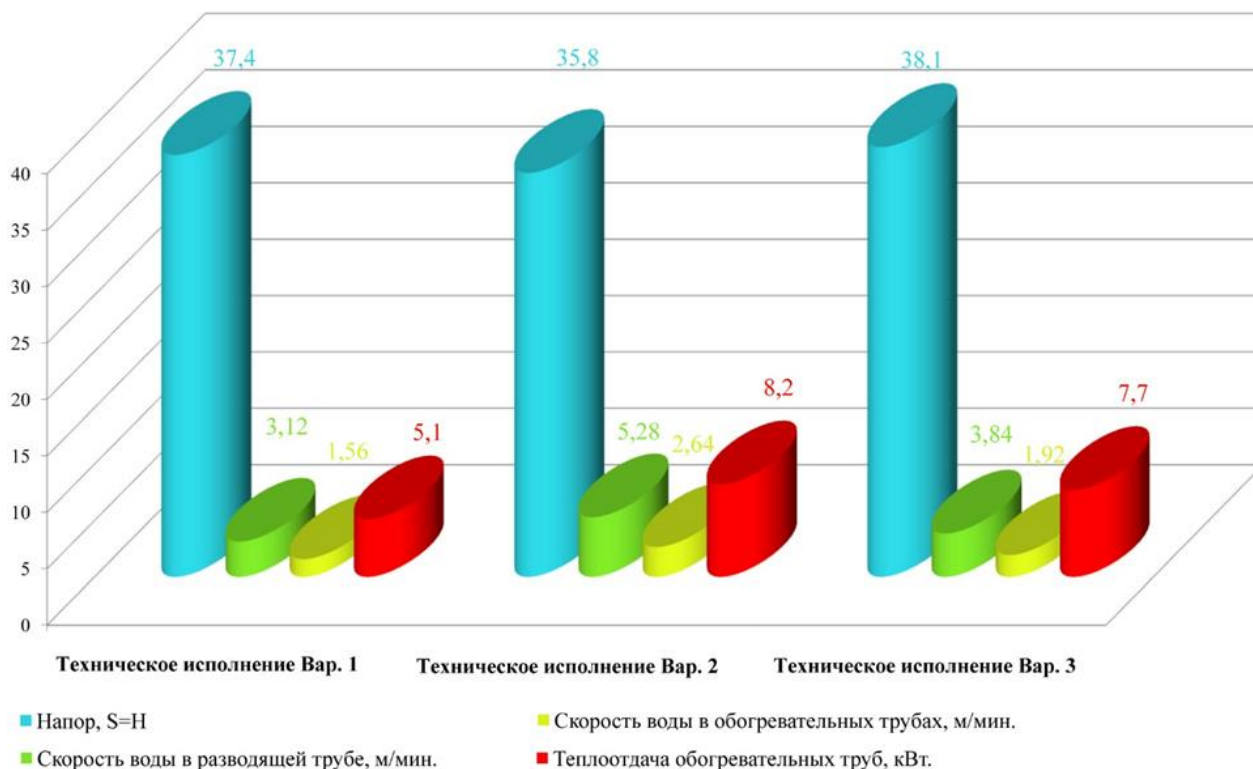


Рис. 5. Результаты математического моделирования

Как видно из результатов, приведенных на гистограмме рис. 5, подвод теплоносителя в обогревательные трубы по двум стоякам без снятия теплоизоляции с разводящей трубы и без применения конвекционных кожухов позволил увеличить скорость циркуляции в 1,7 раза (70 %) по сравнению с первым вариантом исполнения. Увеличение проходного сечения (вар. 3) стояка менее эффективно, скорость циркуляции увеличилась в 1,25 раза (25 %). Изменение формы сечения с круглого на плоско-овальное позволило увеличить площадь теплопередающей поверхности в 1,5 раза (50 %) по сравнению с трубами круглого сечения диаметром 76 мм. Теплоотдача увеличилась с 5,1 до 8,2 кВт. С увеличением скорости циркуляции на сравнимых температурных режимах вар. 2, вар. 3 она увеличилась с 7,7 до 8,2 кВт, или на (7 %).

Выводы. В работе рассмотрены варианты решения научно-прикладной задачи по усовершенствованию систем

отопления пассажирских вагонов с целью повышения их эффективности. Установлено, что в настоящее время для увеличения площади теплопередающих поверхностей применяют оребрение обогревательных труб. Для увеличения скорости циркуляции теплоносителя разработана и испытана система отопления с двумя стояками с применением конвекционных кожухов, используют принудительную циркуляцию воды электрическим насосом.

В работе предложены и проанализированы технические решения по увеличению скорости циркуляции. Подвод теплоносителя в обогревательные трубы по двум стоякам без снятия теплоизоляции с разводящей трубы и без применения конвекционных кожухов позволил увеличить скорость циркуляции в 1,7 раза (70 %), увеличение проходного сечения стояка менее эффективно, скорость циркуляции увеличилась в 1,25 раза (25 %).

Предложены технические решения по увеличению теплопередающей поверхности отопительных труб за счет изменения формы сечения с круглого на плоскоо-вальное, что позволило увеличить площадь теплопередающей поверхности в 1,5 раза (50 %). Теплоотдача увеличилась с 5,1 до 8,2 кВт. Стоит отметить, что теплоотдача отопительных труб с увеличением скорости циркуляции на сравнимых температурных режимах вар. 2, вар. 3 увеличилась с 7,7 до 8,2 кВт (7 %).

Применение двух стояков позволяет отказаться от применения циркуляционно-го насоса, по результатам математического моделирования, при скорости циркуляции теплоносителя 6 м/мин (скорость циркуляционного насоса) увеличение

теплоотдачи обогревательных труб составляет 11 %.

Использование труб с плоско-овальным сечением позволяет отказаться от применения оребренных труб, стоимость которых, на сегодняшний день, выше на 70 %. С учетом эксплуатационных затрат на оребренные трубы, а именно: покраска при плановых видах ремонтов, очистка ребер от осевшей пыли, применение плоскоовальных труб экономически целесообразнее.

Результаты исследований можно использовать не только при постройке новых вагонов, но и проводить модернизацию отопительных установок в вагонах эксплуатационного парка в условиях депо.

Список использованных источников

1. Мямлин, С. В. Новые технологии в проектировании дизель-поездов [Текст] / С. В. Мямлин, А. В. Кивишева // Локомотив-информ. – 2013. – №11. – С. 4-5.
2. Попередні випробування систем життєзабезпечення пасажирського плацкартного вагона, дообладнаного системою кондиціонування [Текст] / О. Г. Дуганов, В. Т. Вислогузов, Ю. В. Кебал [та ін.] // Интеграция Украины в международную транспортную систему (21.05-22.05.2009) : тез. I Междунар. науч.-практ. конф. / Мин-во транспорта и связи Украины, Днепрпетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепрпетровск: ДНУЖТ, 2009. – С. 22-23.
3. Кукса, Ю. Я. Перспективы модернизации пассажирских вагонов при проведении капитально-восстановительного ремонта [Текст] / Ю. Я. Кукса, П. М. Мустафа, И. Ю. Хоменко // Железнодорожный транспорт Украины. – 2010. – № 2. – С. 28-30.
4. Khomenko, I. Yu. Mathematical modeling of unsteady heat exchange in a passenger car [Text] / I. Yu. Khomenko // Наука і прогрес транспорту: вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – № 6 (48). – С. 147-155.
5. Гудыма, Е. В. Повышение эффективности вентиляционных систем пассажирских вагонов [Текст] / Е. В. Гудыма // Вестник ВНИИЖТ. – 1988. – № 7. – С. 42-46.
6. Жариков, В. А. Климатические системы пассажирских вагонов [Текст] / В. А. Жариков. – М. : Трансинфо, 2006. – 135 с.
7. Жариков, В. А. Повышение теплоотдачи отопительных труб пассажирского вагона путем оребрения [Текст] / В. А. Жариков, Б. Н. Китаев, Е. В. Гудыма // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – № 4. – С. 32-34.
8. Sweeney E. Modification of Luas heating and ventilation systems to reduce energy consumption – conference papers [Электронный ресурс] / E. Sweeney, J. Brunton // Dublin Institute of Technology. – 2013. – 5-6th September. – Режим доступа: <http://arrow.dit.ie/engschmecon/> – Загл. с экрана. – Дата обращения: 19.11.2017.
9. Vetterli N. Energy efficiency of railway vehicles [Text] / [N. Vetterli, U.-P. Menti, F. Sidler, E. Thaler, G. Zweife] // CISBAT 2015 : International Scientific Conference (9.09-11.09.2015) / Lausanne, Switzerland 2015. – P. 955–960.

10. Зворыкин, М. Л. Кондиционирование воздуха в пассажирских вагонах [Текст] / М. Л. Зворыкин, В. М. Чекриз. – М. : Транспорт, 1977. – 286 с.

11. Дмитриевская, Т. Ю. Система отопления – естественная циркуляция теплоносителя [Электронный ресурс] / Т. Ю. Дмитриевская // СОК – 2010. – № 1. – Режим доступа: <http://www.c-o-k.ru/articles/sistema-otopleniya-estestvennaya-cirkulyaciya-teplonositelya>.

12. Китаев, Б. Н. Теплообменные процессы при эксплуатации вагонов [Текст] / Б. Н. Китаев. – М.: Транспорт, 1984. – 184 с.

Білошицький Едуард Васильович, аспірант, інженер-конструктор «Проектно-конструкторського технологічного бюро» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Тел. +38 (056) 371 51 12. E-mail: e.beloshickiy@gmail.com.

Мямлін Сергій Сергійович, науковий співробітник «Проектно-конструкторського технологічного бюро» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Тел. +38 (056) 371 51 12. E-mail: sergeymyamin91@gmail.com.

Biloshytskyi Eduard engineering designer «Project design and technological bureau», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Tel. +38 (056) 371 51 12. E-mail: e.beloshickiy@gmail.com.

Sergiy S. Myamlin, researcher «Project design and technological bureau», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Tel. +38 (056) 371 51 12. E-mail: sergeymyamin91@gmail.com.

Стаття прийнята 18.12.2017 р.

УДК 69.059

РЕМОНТ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАСАДОВ ИСТОРИЧЕСКИХ ЗДАНИЙ ГОРОДА ХАРЬКОВА

Д-р техн. наук Д. Ф. Гончаренко, асп. Д. В. Чибаров (ХНУСА)

РЕМОНТ І ВІДНОВЛЕННЯ ФАСАДІВ ІСТОРИЧНИХ БУДІВЕЛЬ МІСТА ХАРКОВА

Д-р техн. наук Д. Ф. Гончаренко, асп. Д. В. Чибаров (ХНУБА)

REPAIR AND RECONSTRUCTION OF FACADES OF HISTORICAL BUILDINGS OF KHARKOV CITY

Dr. sc. sciences D. F. Goncharenko, sciences, pg. D. C. Chibarov

Статья посвящена вопросу ремонта и реставрации фасадов исторических зданий на примере города Харькова. Рассмотрен вопрос сохранения исторической и архитектурной специфики городов в настоящее время. Изучены факторы, вызывающие разрушение элементов фасадов исторических зданий. Приведены отделочные материалы, используемые при ремонтно-восстановительных работах. Дана последовательность и методы восстановления утраченных архитектурных деталей. Рассмотрены организационно-технологические решения, применяемые при ремонте и восстановлении фасадов исторических зданий.

***Ключевые слова:** историческое здание, фасады, разрушающие факторы, отделочные материалы, ремонт, восстановление.*

Стаття присвячена питанню ремонту та реставрації фасадів історичних будівель на прикладі міста Харкова. Розглянуто питання збереження історичної та архітектурної специфіки міст в даний час. Вивчено фактори, що викликають руйнування елементів фасадів історичних будівель. Наведено оздоблювальні матеріали, використовувані при ремонтно-відновлювальних роботах. Дана послідовність і методи відновлення втрачених архітектурних деталей. Розглянуто організаційно-технологічні рішення, що застосовуються при ремонті і відновленні фасадів історичних будівель.

Ключові слова: історична будівля, фасади, руйнівні фактори, оздоблювальні матеріали, ремонт, відновлення.

The article is devoted to the issue of repair and restoration of facades of historical buildings on the example of the city of Kharkov. The analysis of the latest researches and publications devoted to this issue is carried out. The methods of preserving and restoring the appearance of historic buildings are described. The issue of preserving the historical and architectural specifics of cities at the present time is considered. The factors causing destruction of facade elements of hysterial buildings and methods of fighting them were studied. Finishing materials used for repair and restoration works of brick facades and facades with lined plaster solutions are described. The sequence of restoration of lost architectural details is given. The organizational and technological solutions used in the repair and restoration of facades of historic buildings are given. The conducted research contributes to the development of new organizational and technological solutions for the repair and restoration of facades of historic buildings.

Keywords: Historical building, facades, destructive factors, finishing materials, repair, restoration.

Введение. Улучшению внешнего вида зданий уделяется большое внимание во всем мире.

Целесообразно различать три метода работ по сохранению, восстановлению или улучшению внешнего вида зданий [5]. Первый метод – это реставрация, т.е. наиболее полное восстановление первоначального или наиболее выразительного облика здания. Такой вид работ производят на объектах, имеющих признанные эстетические качества или историческое значение, т.е. являющихся памятниками истории или включение которых в эту почетную категорию уже назревает.

Реставрацию ведут на основе изучения и анализа процесса возникновения и эксплуатации здания, а особенно переделок и наслоений, появившихся за это время. Реставрация фасадов заключается в точном восстановлении особенностей отделки здания снаружи, его интерьеров, а также отдельных деталей.

Второй метод работ – частичная реконструкция или улучшение внешнего вида здания путем ремонта, с ликвидацией сделанных в нем переделок, ухудшающих его. При этом допускается изменение отдельных фрагментов и деталей отделки.

Третьим методом является полная реконструкция его фасадов с приданием зданию другого облика. Этот вид реконструкции может быть применен в зданиях, претерпевших большое количество изменений, в корне исказивших его первоначальный вид.

Потребность сохранения историко-архитектурной специфики городов в настоящее время возросла в связи с необходимостью сохранения исторически сложившейся городской среды. Исторические районы образованы многофункциональными архитектурными объектами, принадлежащими различным стилевым эпохам и обладающими культурно-исторической и архитектурно-градостроительной ценностью, поэтому

сохранение фасадов исторических зданий является важнейшей задачей в формировании городской среды [10].

Анализ последних исследований и публикаций. Варианты реконструкции фасадов реконструируемых зданий довольно подробно рассмотрены в работах Федорова В. В., Шихова А. Н. [11, 14, 15]. Применяемые отделочные материалы рассмотрены в работе Пруцына О. И. [8]. Технология восстановления фасадов рассмотрена в работах Девятаевой Г. В., Кочерженко В. В., Никитина А. С. [3, 6, 7]. Факторы, вызывающие разрушение фасадов описаны в работах Рожиной С. И., Шагина А. Л. [9, 13]. Зарубежный опыт ремонта и восстановления фасадов описан в работах Ahmed S. и Kutut V. [16, 17].

Определение цели и задачи исследования. Целью исследования является определение факторов, влияющих на разрушение фасадов исторических зданий, выбор отделочных материалов, используемых при реставрации фасадов, и организационно-технологических решений, применяемых при их ремонте и восстановлении. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

– выполнить исследование состояния фасадов исторических зданий Харькова, подлежащих восстановлению, и определить факторы, вызывающие разрушение их элементов;

– выполнить анализ строительных материалов и конструкций, используемых для восстановления фасадов;

– рассмотреть организационно-технологические решения, применение которых повышает эффективность ремонтно-восстановительных работ.

Основная часть исследования. В процессе реконструкции зданий, имеющих историческую ценность или являющихся памятниками архитектуры, возникает необходимость проводить работы по восстановлению или ремонту фасадов. Основная задача этих работ – более точно воспроизвести внешний облик здания.

Факторы, ведущие к разрушению элементов фасадов. Проведенные авторами исследования показали, что особенно в плачевном состоянии находятся фасады исторических зданий ранней постройки, что связано с потерей их первоначального вида из-за загрязнения атмосферы. Очистка фасадов пескоструйными аппаратами, гидросмыв и т. п. не дают положительных результатов и не способствуют их восстановлению.

Проведенные исследования [1, 2, 12] показали, что планированию ремонтно-восстановительных работ должно предшествовать диагностическое обследование, с помощью которого определяется техническое состояние фасада и основные причины повреждения внешнего вида здания.

Повреждения стен фасадов происходят из-за систематического воздействия влаги, попеременного замораживания и оттаивания, выветривания поверхностного слоя, применения в одной и той же кладке разнородных по прочности, водопоглощению, морозостойкости и долговечности материалов, что вызывает деформацию несущих продольных и самонесущих торцовых стен. Кроме этого к разрушению фасадов приводит ослабление перевязки, утолщение швов, недостаточное опирание несущих конструкций, промерзание раствора, увлажнение карнизов (рис. 1), парапетов, архитектурных деталей, балконов, лоджий, оштукатуренных стен и других выступающих частей зданий [13].

В процессе эксплуатации фасада необходимо обращать внимание на надежность крепления архитектурно-конструктивных деталей, которые обеспечивают статическую и динамическую устойчивость к воздействию природно-климатических факторов.

Карнизы, венчающие часть здания, отводят от стены дождевые и талые воды и выполняют архитектурно-декоративную функцию аналогично другим архитектурно-конструктивным элементам фасада здания. Фасады здания могут иметь и промежу-

точные карнизы, пояски, сандрики, выполняющие функции, аналогичные функциям главного венчающего карниза. От технического состояния карнизов,

поясков, пилястр и других выступающих частей фасада зависит безотказность ограждающих конструкций здания.



Рис. 1. Замачивание карниза и части стены в результате повреждения кровли

Цоколь является наиболее увлажняемой частью здания из-за воздействия атмосферных осадков (рис. 2), а также влаги, в том числе проникающей по капиллярам материала фундамента. Эта часть здания постоянно подвергается неблагоприятным механическим воздействиям, что требует использования для цоколя прочных и морозоустойчивых материалов [4, 8, 15].

Строительные материалы и методы производства работ, применяемые при ремонте и восстановлении фасадов. Улучшение внешнего вида зданий возможно только путем их улучшенной штукатурки и колерной покраски. Однако отделка, выполненная на основе цементно-песчаного раствора с последующей окраской фасадными красками на

органических растворителях, является недолговечной.

Наиболее привлекательными и долговечными являются сухие штукатурные смеси заводского изготовления на основе высококачественного цемента и высокоэффективных полимерных добавок. Сухие штукатурные смеси используют для получения гидрофобных, высокоадгезионных, облегченных, быстротвердеющих и цветных штукатурных слоев. К их основным преимуществам относится соблюдение заданного состава и долевого соотношения компонентов. При затворении водой такие составы позволяют приготовить пластичную, безусадочную, нерасслаивающуюся растворную смесь с хорошей адгезией к обрабатываемой поверхности.



Рис. 2. Разрушение цокольной части здания в результате повреждения водосточных труб:
а – на здании по адресу: ул. Поэзии 5; б – на здании института им. Мечникова

Фасадные штукатурки дороже, чем обычные цементно-песчаные, однако этот недостаток компенсируется рядом преимуществ, к которым относятся уменьшение толщины наносимого слоя и, как следствие, увеличение производительности труда. Фасадные штукатурки характеризуются морозостойкостью, трещиностойкостью и высокой прочностью на отрыв. Кроме того, они отличаются быстротой и низкой трудоемкостью приготовления растворов на месте производства работ (что сокращает транспортные расходы), высоким качеством и долговечностью штукатурных слоев.

Для придания фасадным штукатуркам декоративных качеств применяют экологически чистые водорастворимые краски, которые делятся по типу связующего на акриловые (латексные), силикатные, силиконовые, цементные и известковые.

Представляет интерес восстановление фасадов Мариинской гимназии, которая

располагается по ул. Рымарской, 11 в г. Харькове.

До начала работ была выполнена работа по очистке фасадов от красочных наслоений. Покраска снималась механическим способом с помощью шпателей и другого механического инструмента. После расчистки определялось состояние поверхности фасадов, степень выветривания лицевой поверхности кирпича, утраты, ремонтные заделки, разрушенный кладочный раствор.

В целом фасады требовали дополнительного кладочного раствора для выравнивания лицевой поверхности, а также в местах разрушения кладки. Из швов удалили разрушенный (рассыпающийся) кладочный раствор. Выравнивание швов с расшивкой по аналогии со старым образцом выполнялось известково-песчаным раствором состава 1:3 с добавкой 0.2 частей портландцемента.

Небольшие по толщине сколы – не более 1 см, выравнивались за один раз. Сколы свыше 1 см выравнивались послойно во избежание усадки раствора. В штукатурном растворе для лицевого слоя использовался тонкозернистый кварцевый песок с целью получения выглаженной поверхности доделки.

Выравнивание мелких побитостей, следов выветривания выполнялось по отдельным кирпичам и фрагментам кладки с использованием штукатурного раствора, состоящего из известкового теста II сорта, портландцемента М400 и мелкозернистого песка, фракции до 0.5 мм.

Для получения необходимой прочности выравнивающих затирок соблюдалась следующая технология их нанесения:

- перед нанесением раствора поверхность увлажнялась;
- работы велись с теневой стороны в нежаркую погоду;
- после схватывания предотвращалось пересыхание затирок и доделок путем полива их водой на протяжении 3-5 дней по 2-4 раза в день, в зависимости от погоды.

Общая перетирка всех поверхностей выполнялась для получения качественного, ровного красочного слоя. Перетирка выполнялась известково-песчаным раствором 1:1. Известковое тесто для перетки должно было быть не ниже 2 сорта по ГОСТ 9177-79. Заполнитель – кварцевый песок, тонкозернистый, без глинистых примесей, фракция до 0.2 мм.

Была предложена технология окраски фасадов известковым улучшенным составом. Известковый окрасочный колер и грунтовка готовились на основе известки-кипелки, олифы и пигментов:

- известь-кипелка – 1,2-1,5 кг;
- олифа натурная – 100-120 г;
- пигменты – до заданного цвета, но не более 300 г;
- вода – до объема 10 л.

Известь-кипелку гасили в 4-5 л воды, все время перемешивая. В период

наибольшего бурления извести в нее вводили олифу при перемешивании. После гашения извести в полученную эмульсию вводили предварительно замоченные в воде пигменты. Перед употреблением добавляли воду до объема 10 л и весь состав перемешивали.

Известковый колер готовили в объеме на весь фасад. Колер проверяли опытными выкрасками на фасаде. Для улучшения качества колера красочной пленки на оболочку колера добавляли 1 пачку поваренной соли «Экстра».

Окраска фасадов выполнялась в следующей последовательности:

- окрашиваемая поверхность обильно смачивалась водой;
- по исчезновении капельной влаги по влажной поверхности выполнялась покраска за два раза;
- через три-четыре часа увлажнялась окрашенная поверхность водой из пульверизатора, не допуская водных потеков.

Когда окраска велась в сухую жаркую погоду, смачивание повторялось по мере высыхания красочного слоя. Окрасочные работы велись с теневой стороны, утром и вечером, так как под прямыми солнечными лучами известковая покраска не набирает прочности. Окрасочные работы в дождь и при понижении температуры до +5°C не выполнялись (рис. 3).

В 2013 г. были выполнены работы по восстановлению фасада и кровли здания института им. Мечникова.

Техническое состояние основных несущих конструкций было приемлемым. Отделка главного и торцевых фасадов была неудовлетворительной. Металлическое ограждение и листы кровли по всему периметру здания были поражены коррозией, деформированы и находились в плохом состоянии. Отдельные водосточные трубы отсутствовали, а некоторые были частично разрушены.



Рис. 3. Фасад здания Мариинской гимназии после ремонта

Кирпичная кладка всех вентиляционных коренников, отдельных пьедесталов и мест, где отсутствовал слой штукатурки, была разрушена путем размораживания и расслоения с выпадением кирпичей и выветриванием раствора. А кирпичная кладка стен ограждения имела выпучивание и провисание, грозила обрушением.

Бетон вентиляционных шахт был разрушен и удерживался за счет металлических листов обшивки шахт. Защитный слой бетона отдельных архитектурных элементов отсутствовал с оголением арматуры.

Деревянные рамы светового фонаря были поражены гнилью по всей поверхности, а остекление имело сколы и механические повреждения.

Штукатурный слой железобетонного ограждения кровли на всей площади отслоился и частично был разрушен. Штукатурный слой декоративных элементов, фасадов, особенно карнизов, имел трещины и местами был обрушен, а на некоторых участках наблюдались пятна сырости.

За длительный срок эксплуатации, будучи открытыми сверху, архитектурные детали подверглись увлажнению и размораживанию бетона. Грифоны, жертвенные чаши и полусфера имели значительные разрушения и многочисленные трещины. Орнамент деталей главного фасада был обвален на отдельных участках.

Основная причина дефектов кровли и фасадов – длительная эксплуатация без текущих и капитальных ремонтов, результат увлажнения и размораживания бетона в период переменных температур, отсутствие металлических покрытий выступающих деталей, коррозия металла.

Таким образом, исходя из вышесказанного для приведения фасадов и кровли в нормальное эксплуатационное состояние необходимо было выполнить комплекс работ, заключающихся в следующем:

– выполнить обивку слабо держащихся участков штукатурного слоя фасада и архитектурных деталей с последующим его восстановлением;

- выполнить замену архитектурных деталей, грозящих обрушением;
- выполнить замену кровли;
- восстановить разрушенную кладку вентиляционных коренников;
- вентиляционные шахты демонтировать с последующим их восстановлением;
- металлическое ограждение кровли заменить по типу существующего;
- восстановить водосточные трубы;
- новый штукатурный слой выполнить полимерцементным раствором марки 100.

Для достижения поставленных задач, согласно принятым научно-проектным и конструкторским решениям, были выполнены следующие виды работ:

- демонтажные работы по разборке кирпичной кладки деструктированных участков парапетов производились с максимальной осторожностью, чтобы не повредить соседние архитектурные элементы. Демонтаж скульптур (грифонов) производили по одной скульптуре, закрепляя вышележащий элемент «зонтик» опорными стойками. Демонтаж архитектурных деталей (гирлянды, пояски и т. д.) выполняли после снятия с них форм для последующего выполнения копий;
- работы по инъектированию кладки акротериев и прямоугольных частей парапета выполняли комбинированной двухкомпонентной цементной суспензией с использованием металлических форсунок и ручного инъектора. Все заполняемые швы и пустоты предварительно были продуты и промыты под давлением;
- после удаления «бухтящих» слоев штукатурки, поверхность была очищена от пыли, промыта и обработана грунтовкой глубокого проникновения;
- реставрацию кирпичной кладки производили методом вставок, используя красный глиняный кирпич М75 на цементно-известковом растворе М50;
- дубликаты лепных архитектурных деталей выполняли методом отливки

цементно-песчаной смесью с заполнителем из гранитной крошки фракции не более 1,0 мм и добавлением фибры. Крепление этих деталей выполняли на клеюющей смеси, строго выдерживая технологические временные интервалы;

- докомпоновку незначительных (до 2-3 см) утрат архитектурных деталей выполняли ремонтно-восстановительной смесью. А докомпоновку значительных утрат производили реставрационной штукатуркой послойно, с соблюдением технологических временных интервалов и температур воздуха. При ускоренной работе укладывали армированную сетку между слоями;

- окраску фасада выполняли фасадными красками согласно паспорта и технологии фирмы-изготовителя. После выполнения штукатурных работ на фасаде нанесение грунтовочного слоя выполнялось не ранее, чем через 20 дней.

Во время проведения работ по восстановлению здания института применялись различные реставрационные материалы:

- работы по очистке фасадов выполнялись механическим способом, а также водой под давлением с использованием смывок и моющих средств типа «Лотос» [21];

- кладочные работы выполнялись с использованием красного глиняного обожженного кирпича М 75, цементно-известкового раствора М 50, кладочной сетки 100x100 (d – 4 мм) и тканой металлической сетки №12,5 – 0,5 по ТУ 14-4-713-76;

- для поддерживающих металлоконструкций использовали швеллер № 16 и уголок равнополочный № 63;

- для докомпоновки архитектурных и лепных деталей использовали реставрационные смеси фирмы «Remmers» [20]. Для инъектирования трещин в кирпичной кладке и бетоне использовали материалы фирмы «Cerezit» [22]; для грунтовки поверхности под штукатурную отделку и нанесения штукатурного слоя использовали

матеріали фірми «Remmers» – Aida Injectionslem [19];

– для гідрофобізації різних поверхонь використовували гідрофобний склад Sikagard-703W [18], що дозволяє виконувати наступну фарбування фасаду-

ними фарбами. Фарбування фасаду виконували фасадними фарбами типу «SaraGol» [23]. Кровельні роботи виконували кровельною оцинкованою сталлю з наступною фарбуванням відповідними емалями згідно з паспортом (рис. 4).



Рис. 4. Зданье института им. Мечникова после восстановления фасада

Выводы. Сохранение исторических зданий является важнейшей задачей в формировании городской среды, подтверждением чему являются работы, выполняемые проектировщиками, архитекторами и строителями, направленные на повышение эффективности ремонта и восстановления фасадов.

Проведенные исследования состояния исторических зданий Харькова позволили установить основные факторы, ведущие к разрушению конструктивных элементов и отделки стен фасадов. В первую очередь это разрушение карнизов, стен и цоколя вследствие неисправностей кровли зданий, загрязнения атмосферы, в результате которых в первую очередь подвергаются разрушению фасады зданий, построенные в позапрошлом и в прошлом столетии.

Рассмотрены строительные материалы, которые эффективно используются для ремонта и восстановления фасадов. Это в первую очередь сухие штукатурные смеси, которые используют для получения гидрофобных, высокоадгезионных, быстротвердеющих и цветных штукатурных слоев.

Приведены примеры подбора красок для ремонта фасадов исторических зданий города, а также технологические решения выполнения ремонтно-восстановительных работ.

Рассмотрены технологии ремонта зданий Мариинской гимназии и института им. Мечникова, где выполнялись ремонтно-восстановительные работы по ремонту фасадов, которые являются свидетельством высокой эффективности разработанных решений и высокого качества работ.

Список использованных источников

1. Обследование и анализ архитектурно-конструктивных особенностей памятника архитектуры в городе Харькове [Текст] / Л. В. Гапанова, С.С. Гребенчук, А.С. Константинов, Д. В. Чибаров // Науковий вісник будівництва. – 2017. – №2(88). – С. 124-131.
2. Гончаренко, Д. Ф. Исследование состояния конструкций исторического здания оперного театра в г. Харькове с целью размещения в нем городской филармонии [Текст] / Д. Ф. Гончаренко, Д. В. Чибаров // Науковий вісник будівництва. – 2016. – №2(84). – С. 212-218.
3. Девятаева, Г. В. Технология реконструкции и модернизации зданий [Текст] : учеб. пособие / Г. В. Девятаева. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 250 с.
4. Иванов, Ю. В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление, восстановление, ремонт [Текст] : учеб. пособие / Ю. В. Иванов. – М.: Издательство АСВ, 2012. – 312 с.
5. Касьянов, В. Ф. Реконструкция жилой застройки городов [Текст] / В. Ф. Касьянов. – М.: Издательство АСВ, 2002. – 208 с.
6. Кочерженко, В. В. Технология реконструкции зданий и сооружений [Текст] : учеб. пособие / В. В. Кочерженко, В. М. Лебедев. – М.: Издательство АСВ, 2007. – 224 с.
7. Техническая эксплуатация и технология ремонта зданий и сооружений [Текст] / А. С. Никитин, М. В. Романенко, В. Ф. Кобзарев [и др.]. – СПб.: ВИТУ, 2003. – 251 с.
8. Пруцын, О. И. Реставрационные материалы [Текст] : учебник для вузов / О. И. Пруцын. – М.: Институт искусства реставрации, 2004. – 264 с.
9. Техническая эксплуатация зданий и сооружений [Текст] : учеб. пособие / С. И. Рощина, М. В. Лукин, М. С. Лисятников, Н. С. Тимахова; под ред. С. И. Рощиной. – М.: КНОРУС, 2016. – 232 с. – (Бакалавриат).
10. Сотников, Б. Е. Архитектурно-историческая среда [Текст] : учеб. пособие / Б. Е. Сотников. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 208 с.
11. Федоров, В. В. Реконструкция и реставрация зданий [Текст] : учебник / В. В. Федоров. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 208 с.
12. Чибаров, Д. В. Факторы, влияющие на долговечность и несущую способность конструкций зданий в городе Харькове [Текст] / Д. В. Чибаров // Науковий вісник будівництва. – 2017. – №3(89). – С. 100-105.
13. Реконструкция зданий и сооружений [Текст] : учеб. пособие для строит. спец. вузов / А. Л. Шагин, Ю. В. Бондаренко, Д. Ф. Гончаренко, В. Б. Гончаров; под ред. А. Л. Шагина. – М.: Высшая школа, 1991. – 352 с.
14. Шихов, А. Н. Реконструкция гражданских и промышленных зданий [Текст] : монография / А. Н. Шихов; М-во с.-х. РФ, федеральное гос. бюджетное образоват. учреждение высшего проф. образов. «Пермская гос. с.-х. акад. им. акад. Д.Н. Прянишникова». – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2015. – 399 с.
15. Шихов, А. Н. Реконструкция, усиление и повышение изоляционных качеств гражданских зданий [Текст] : учеб. пособие / А. Н. Шихов, Д.А. Шихов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 244 с.
16. Ahmed S. Abd Elrahman, Randa A. Mahmoud. The post-revolutionary effect on the urban harmony of Cairo's built environment in relation to the collective memory of the populayion: Urban context of the "after revolution" between contravention and elaboration [Text] // Ain Shams Engineering Journal. – Vol. 7, Issue 4, December 2016. – P. 1099-1106.
17. Kutut V., Zavadskas E.K., Lazauskas M. Assessment of priority alternatives for preservation of historic buildings using model based on ARAS and AHP methods [Text] // Arhives of Civil and Mechanical Engineering. – Vol. 14, Issue 2, February 2014. – P. 287-294.
18. Гидрофобный состав для фасадов Sikagard-703W [Электронный ресурс]. 2017. – Режим доступа: <http://www.ukrpolystroy.com.ua/shop/gidrofobnyiy-sostav-dlya-fasadov-sikagard-703w/>.

19. Общестроительный ассортимент фирмы Remmers [Електронний ресурс]. 2017. – Режим доступа: <http://www.remmers.net.ua/catalog/category/id/1#sthash.I4cgm9dQ.UxWHvFy7.dpbs>.
 20. Реставрационный раствор Remmers Restauriermörtel [Електронний ресурс]. 2017. – Режим доступа: <https://www.vertikalstar.in.ua/p315816732-restavratsionnyj-rastvor-restauriermortel.html>.
 21. Синтетическое моющее средство «Лотос» [Електронний ресурс]. 2017. – Режим доступа: <http://www.kfmc.ru/node/32>.
 22. Средство для защиты от капиллярной влаги Ceresit CO 81 [Електронний ресурс]. 2017. – Режим доступа: http://www.km-stroy.com/show_good.php?idtov=682.
 23. Фасадные краски Caparol [Електронний ресурс]. 2017. – Режим доступа: <http://www.caparol.ua/ua-ru/produkty/kraski/fasadnye-kraski/toniruemye-mashinnym-sposobom.html>.
-

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

Чибаров Данііл В'ячеславович, аспірант кафедри технології будівельного виробництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (095)741-76-72. E-mail: daniilchibarov@gmail.com.

Goncharenko Dmytro F., doct. of techn. sciences, professor, Vice Rector of research and educational work, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (057) 700-02-40. E-mail: gonch@kstuca.kharkov.ua.

Chibarov Daniel V., postgraduate student Chair of construction technologies, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (095) 741-76-72. E-mail: daniilchibarov@gmail.com.

Стаття прийнята 18.12.2017 р.

УДК 626/627

ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ШЛЮЗІВ НА СКЕЛЬОВІЙ ОСНОВІ ЗА КРИТЕРІЯМИ СТІЙКОСТІ ПРОТИ ЗСУВУ, ПЕРЕКИДАННЯ І СПЛИВАННЯ КАМЕР ШЛЮЗІВ НА ПРИКЛАДІ ГІДРОВУЗЛІВ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ

Канд. техн. наук А. О. Мозговий (ХНУБА)

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КАМЕР ШЛЮЗОВ НА СКАЛЬНОМ ОСНОВАНИИ ПО КРИТЕРИЯМ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ СДВИГА, ОПРОКИДЫВАНИЯ И ВСПЛЫТИЯ НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ ДНЕПРОВСКОГО КАСКАДА

Канд. техн. наук А. А. Мозговой (ХНУСА)

PROBABILISTIC RELIABILITY ASSESSMENT OF GATE CHAMBERS ON ROCK FOUNDATION BY THE CRITERIA OF STRENGTH, OVERTURNING AND STABILITY AGAINST DISPLACEMENT OF THE GATE CHAMBERS ON THE EXAMPLE OF HYDRO SCHEMES OF THE DNIEPER CASCADE

Cand. of techn. sciences A. Mozgovuy

У даній роботі набув подальшого розвитку метод оцінки надійності камер шлюзів за критеріями втрати стійкості проти зсуву, перекидання, а також спливання. При цьому враховано випадковий характер зовнішніх навантажень і впливів, які під час експлуатації сприймають камери шлюзів, а також кореляційні залежності між ними. Також враховано випадковий характер механічних властивостей ґрунту основи і кореляційні залежності між

ними. Виконано чисельну імовірнісну оцінку ризику досягнення граничного стану камер шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду. Метод може застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності каскадів гідровузлів.

Ключові слова: камера шлюзу, природні фактори, імовірнісна оцінка надійності, каскад гідровузлів.

В данной работе получил дальнейшее развитие метод оценки надежности камер шлюзов по критериям потери устойчивости против сдвига, опрокидывания, а также всплытия. При этом учтен случайный характер внешних нагрузок и воздействий, которые в процессе эксплуатации воспринимают камеры шлюзов, а также корреляционные зависимости между ними. Также учтен случайный характер механических свойств грунтов основания и корреляционные зависимости между ними. Выполнена численная вероятностная оценка риска достижения предельного состояния камер шлюзов на скальном основании гидроузлов Днепровского каскада. Метод может использоваться при вероятностных расчетах надежности каскадов гидроузлов.

Ключевые слова: камера шлюза, природные факторы, вероятностная оценка надежности, каскад гидроузлов.

This work further develops the method for assessing reliability of gate chambers by the criteria of stability loss against displacement and overturning, as well as floating up. The work considers the random nature of the external loads and impacts, which the gate chambers bear during operation, as well as correlations between them. It also considers the random nature of mechanical properties of the foundation soils and correlations between them.

For solving this problem, the method of statistical tests (Monte Carlo method) was applied, which is widely used for assessing probabilistic reliability of complex technical systems. A numerical probabilistic assessment of the risk when the gate chambers on rock foundation at hydro schemes of the Dnieper Cascade reach the boundary conditions has been performed.

In the future, the proposed method could be used in probabilistic reliability analyses of hydraulic structures and cascades of hydro schemes, taking into account the correlations between natural factors: hydrological characteristics, ice, and wind, as well as temperature loads and impacts.

Key words: gate chamber, natural factors, probabilistic reliability assessment, cascade of hydro schemes.

Вступ. Розрахунок і проектування сучасних гідротехнічних споруд потребують оцінки їх безпеки і надійності на основі імовірнісних методів [1-2]. Судноплавні шлюзи на скельовій основі належать до найбільш поширених спеціальних типів споруд гідровузлів комплексного призначення як в Україні, так і у світі. Функціональним призначенням шлюзів є пропуск суден через створ гідровузла. Основними конструктивними елементами шлюзів є голови, камери і ворота.

Дана робота спрямована на оцінку надійності камер шлюзів на скельовій основі, які входять до складу споруд водопідпільного фронту на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. Надійність судноплавних шлюзів впливає на надійність гідровузла і каскаду гідровузлів у цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні методи оцінки експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд, статистичні методи аналізу їх стану, розробку критеріїв їх надійності розглянуто у роботах О. І. Вайнберга [3],

О. М. Фінагенова [4], С. Г. Шульмана [4], Є. М. Дзюбанова [5], Н. Ю. Дмитрієва [5], М. П. Левіної [5], В. Б. Штільмана [5], Л. Д. Лентаєва [6], Л. В. Смирнова [6], Ц. Є. Мірцхулави [7], Д. В. Стефанішина [8]. Аналіз ризику у гідротехніці, прогнозування аварійності споруд розглянуто у роботах А. Б. Векслера [9], Д. А. Івашинцова [9], Д. В. Стефанішина [9], N.S. Arunraj [10], S. Mandal [10], J. Maiti [10], L. Altarejos-García [11], I. Escudero-Bueno [11], A. Serrano-Lombillo [11], A. Gaspar [12], F. Lopez-Caballero [12], A. Modaressi-Farahmand-Razavi [12], A. Lupoi [13], C. Callari [13], O. Morales-Nápoles [14], D. J. Delgado-Hernández [14], D. De-León-Escobedo [14], H. Z. Su [15], J. Hu [15], Z. P. Wen [15], L. Peyras [16], C. Carvajal [16], H. Felix [16], Z. Y. Wu [17], Y. L. Li [17], J. K. Chen [17], Y. Li [18], Y. Sun [18], B. Li [18], S. E. Cho [19], M. Calamak [20], A. M. Yanmaz [20], M. Alembagheri [21], M. Seyedkazemi [21].

Не розв'язаною раніше частиною проблеми є те, що існуючі методи оцінки надійності гідротехнічних споруд, зокрема судноплавних шлюзів на скельовій основі, не ураховують певні кореляційні залежності [22], які існують між природними факторами, котрі є визначальними при оцінці надійності каскадів гідровузлів [23–24].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є апробація запропонованого алгоритму на камерах шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду із отриманням чисельного значення імовірності виникнення аварії на зазначених гідротехнічних спорудах.

Завданням роботи є розробка алгоритму імовірнісної оцінки надійності камер судноплавних шлюзів на скельовій основі з урахуванням кореляційних залежностей, які існують між природними факторами, а саме – кореляційні залежності між гідрологічними характеристиками

водотоку, температурою і амплітудою коливань температур зовнішнього повітря, кореляційні залежності між характеристиками ґрунту основи.

Основна частина дослідження.

Нижче наведено характеристики шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду.

Трикамерний шлюз Дніпровського гідровузла. Верхня голова шлюзу примикає до глухих прольотів водозливної греблі. Камери шлюзу врізані в скельну основу, верхні третини стінок за висотою знаходяться у відсипках з гірської маси. Висота стінок першої камери 20.8 м, другої камери – 20.3 м, третьої камери – 18.8 м. Дно камер шлюзу врізане в скелю. Стіни камер – прямокутного профілю із консолями, а також – трапецієподібного профілю (див. рис. 1). Клас наслідків споруд гідровузла ССЗ.

Однокамерний шлюз Дніпровського гідровузла. Ширина камери – 18 м, довжина – 283 м, висота – 44,9 м. В основі залягають слабкотріщинуваті граніти. Стіни камери виконані у вигляді тонких бетонних облицювань, заанкерених у скельний масив, у вигляді масивних бетонних облицювань і кутикових залізобетонних підпірних стінок (див. рис. 2). Клас наслідків споруд гідровузла ССЗ.

Шлюз Кременчуцького гідровузла. Шлюз розташовано у верхньому б'єфі, обсіпано ґрунтом до позн. +82.35 м і спряжено із будівлею гідроелектростанції за допомогою земляної вставки. Корисні габарити камери шлюзу 269.10×18 м. Мінімальна глибина в камері – 3.65 м. Споруди шлюзу врізані у скельний масив на глибину від 11 до 21 м. Стіни камери у межах скелі виконані у вигляді бетонних облицювань, а вище – у вигляді залізобетонних стін кутикового профілю (див. рис. 3). Дно камери шлюзу рамної конструкції. Клас наслідків споруд гідровузла ССЗ.

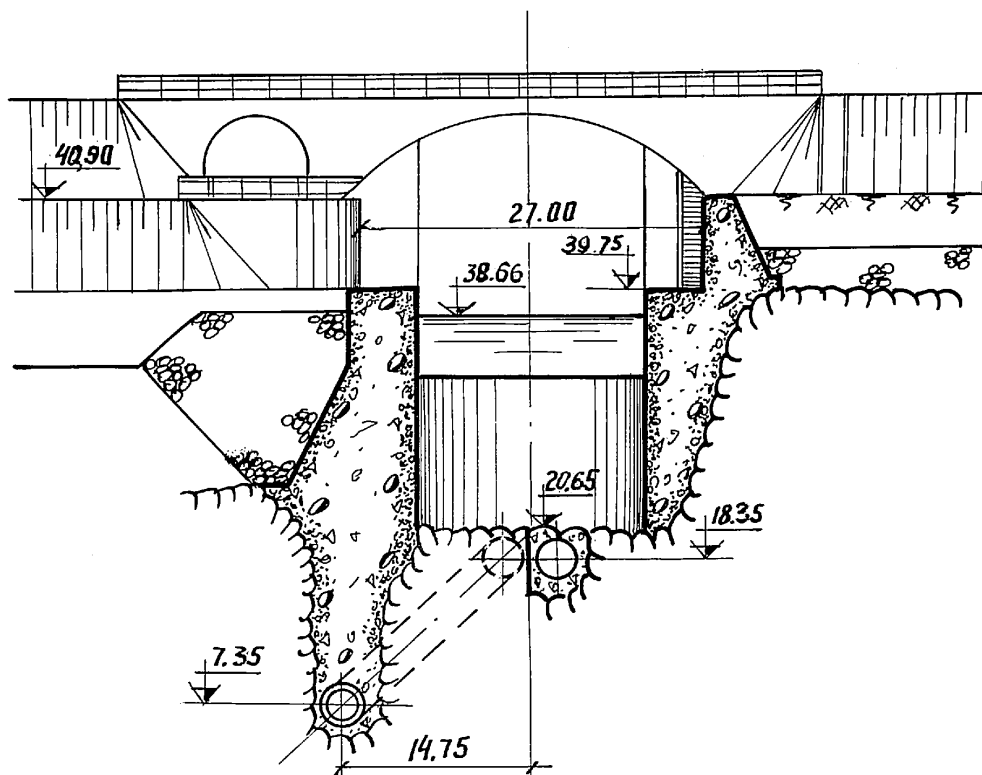


Рис. 1. Друга камера трикамерного Дніпровського шлюзу (розміри у метрах)

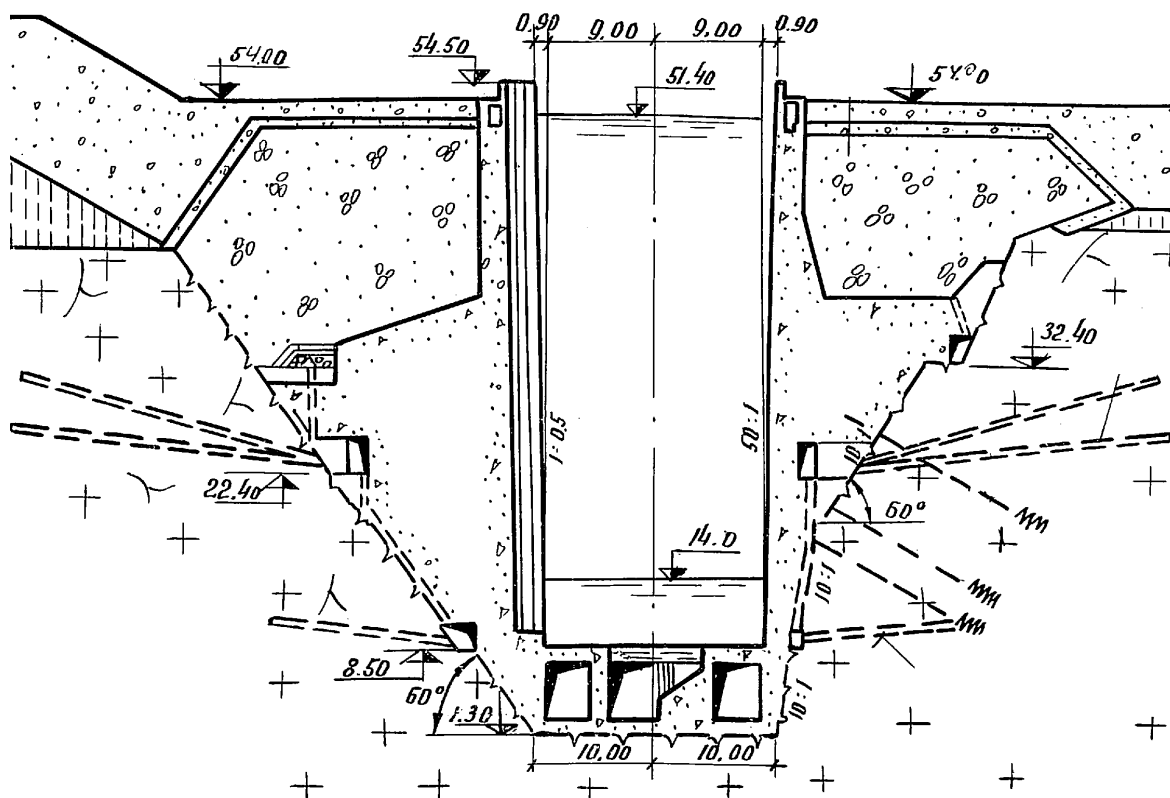


Рис. 2. Камера однокамерного Дніпровського шлюзу (розміри у метрах)

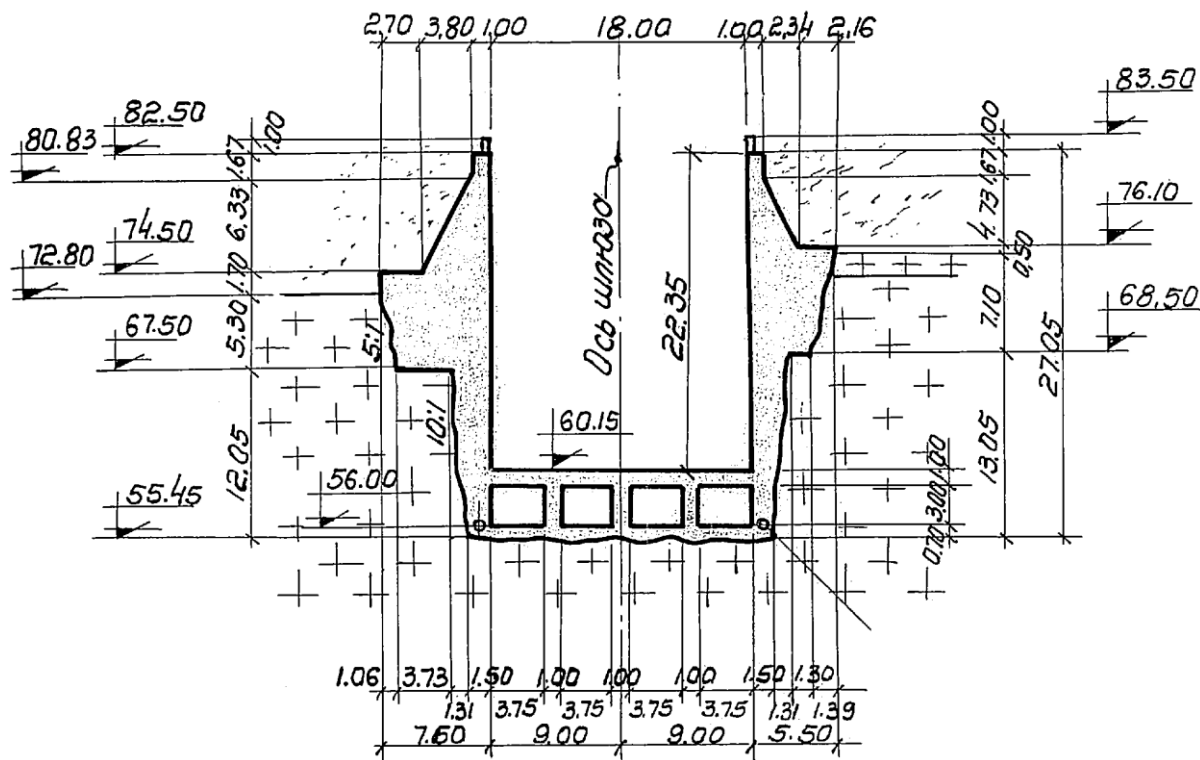


Рис. 3. Камера Кременчуцького шлюзу (розміри у метрах)

Перевірка надійності камер шлюзів за критеріями стійкості проти зсуву і спливання. Розрахунки за детерміністичною методикою виконуються для основного і особливого сполучення навантажень згідно з умовою [1]

$$\gamma_n \times \gamma_{lc} \times F \leq \gamma_c \times R, \quad (1)$$

де F – розрахункове значення узагальненого силового впливу з урахуванням коефіцієнта надійності за навантаженням γ_n ;

R – узагальнена несівна здатність споруди чи основи;

γ_{lc} – коефіцієнт сполучення навантажень, приймається для основного сполучення навантажень $\gamma_{lc}=1.0$; для особливого сполучення навантажень $\gamma_{lc}=0.9$;

γ_c – коефіцієнт умов роботи приймається $\gamma_c = 1.1$;

γ_n – коефіцієнт надійності, приймається $\gamma_n = 1.25$ для споруд класу наслідків СС3.

При виконанні розрахунків розглядаються такі навантаження і впливи:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місце розташування якого не змінюється у процесі експлуатації.

2. Силовий вплив води з боку верхнього і нижнього б'єфів: гідростатичний тиск води з боку обернених засипок; гідростатичний тиск води в камері шлюзу; силовий вплив води, що фільтрується.

3. Температурні впливи.

4. Вага постійного технологічного обладнання, підйомних, транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів.

5. Власна вага і тиск ґрунту обернених засипок.

6. Сейсмічні впливи.

Для оцінки ризику втрати міцності, стійкості на зсув і спливання за методом граничних станів формулу (1) доцільно подати у вигляді

$$k = \frac{R}{F} \geq k_n = \frac{\gamma_n \times \gamma_c}{\gamma_{lc}}, \quad (2)$$

де k – розрахункове значення коефіцієнта запасу стійкості;

k_n – нормативне значення коефіцієнта запасу стійкості.

Отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: для основного сполучення навантажень $k_n = 1,14$; для особливого сполучення навантажень $k_n = 1,02$.

За детерміністичною методикою на основі методу граничних станів отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках:

- однокамерний шлюз Дніпровського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c = 1.54$ (коефіцієнт запасу стійкості проти зсуву), $k_n = 2.26$ (коефіцієнт запасу стійкості проти перекидання), $k_e = 3.12$ (коефіцієнт запасу стійкості проти спливання); для особливого сполучення навантажень $k_c = 1.47$, $k_n = 2.18$, $k_e = 3.05$;

- трикамерний шлюз Дніпровського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c = 1.45$, $k_n = 2.21$, $k_e = 3.11$; для особливого сполучення навантажень $k_c = 1.39$, $k_n = 2.07$, $k_e = 2.95$;

- шлюз Кременчуцького гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c = 1.49$, $k_n = 2.24$, $k_e = 3.24$; для особливого сполучення навантажень $k_c = 1.42$, $k_n = 2.09$, $k_e = 3.14$.

Імовірнісний метод визначення ризику втрати стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камери шлюзу. Розв'язання передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їх імовірнісних характеристик, а також визначення імовірності втрати стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камери шлюзу.

Зазначені вище критерії настання граничного стану є статистично залежними,

тому що їх виникнення обумовлене позначками рівнів води у верхньому б'єфі.

При розгляданні схеми плоского поступального зсуву по горизонтальній поверхні рівняння зв'язку має вигляд

$$k = \frac{(V - W)tg\varphi + c \cdot A_n}{F}, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт стійкості проти зсуву;

V – підсумок вертикальних сил, спрямованих униз;

W – підсумок вертикальних сил, спрямованих догори;

$tg\varphi$ – коефіцієнт внутрішнього тертя;

c – питоме зчеплення;

A_n – площа подошви споруди;

F – узагальнена сила зсуву.

При розрахунку на перекидання використовується рівняння зв'язку

$$k = \frac{M_{ym}}{M_{nep}}, \quad (4)$$

де k – коефіцієнт стійкості проти перекидання;

M_{ym} – момент утримуючих сил;

M_{nep} – момент сил, що перекидають.

При розрахунку на спливання використовується рівняння зв'язку

$$k = \frac{V}{W}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт стійкості проти спливання.

Розглядається типова камера шлюзу. Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи камери шлюзу A_n , м², інші геометричні розміри, вагу допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{\gamma_b} = 0.02$; щільність ґрунту оберненої засипки за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{\gamma_{gr}} = 0.06$; міцність бетону на

стискання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{Rb} = 0.135$.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність pZ позначки рівня води Z , м, перед шлюзом. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між паводковими витратами по гідровузлах Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат p . Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [22, 25].

За значенням pZ визначається квантиль - позначка рівня води Z , м, перед шлюзом. Між максимальними паводковими витратами p . Дніпро у створах гідровузлів каскаду, згідно з [22], існує функціональна залежність. Тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності pZ для шлюзів кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою.

Задається залежність між рівнями верхнього Z_i , м, і нижнього б'єсів $Z_{НБ}$, м.

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності зважуючого протитиску в основі шлюзу pW_f . За значенням імовірності визначається квантиль – величина сили вертикального протитиску W_f , кН.

За значеннями рівнів верхнього Z_i , м, і нижнього б'єсів $Z_{НБ}$, м, визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку оберненої засипки $W_{ГЗ}$, кН.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність щільності ґрунту оберненої засипки ρ_{gr} , за якою визначається квантиль – значення щільності ґрунту ρ_{gr} .

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя $p_{tg\phi_g}$, за якою визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя $tg\phi_g$.

За значеннями ρ_g і $tg\phi_g$ визначається сила бічного тиску ґрунту оберненої засипки на стінку камери шлюзу.

За імовірнісними залежностями щорічних максимально низьких середньомісячних температур за нормальним розподілом, а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур зовнішнього повітря за нормальним розподілом у місцях розташування гідровузлів визначається реактивний тиск ґрунту оберненої засипки [26].

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності зважуючого протитиску в основі шлюзу pW_f . За значенням імовірності визначається квантиль – величина сили вертикального протитиску W_f , кН.

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності Карпат, Вранча, Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані про їх сейсмічну активність опрацьовано у роботі [27]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно з [28].

Під час виконання одного статистичного випробовування, враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів, задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів pJr , розподілені від 0 до 1, у Карпатах, Вранчі, Криму. За значенням pJr визначаються квантилі – бальність землетрусів Jr , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування шлюзу [29].

Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу Jr у криву розподілу максимального сейсмічного впливу J за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової

амплітуди прискорення основи (у частках g) від максимальної бальності землетрусів J , бали за призначений строк служби. Сейсмічний вплив на шлюз задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродинамічний тиск води в обернених засипках, сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження відповідно до [30] визначено лінійно-спектральним методом. Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження S , кН, від розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках g) камери шлюзу. Визначається сейсмічний гідродинамічний тиск води. Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродинамічної сили тиску води E_{psg} , кН, від розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках g) камери шлюзу.

Визначаються рівнодіючі вертикальних сил V і W , і горизонтальних сил F , що діють на камеру шлюзу. При цьому ураховуються як випадкові, так і детерміністичні навантаження.

Характеристики ґрунту основи задані випадковими величинами відповідно до норм проектування основ гідротехнічних споруд [31-32]. Коефіцієнт внутрішнього тертя $tg\varphi$ і питоме зчеплення c задані за нормальним законом, як випадкові корельовані величини. Такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування $m_{tg\varphi}$, m_c , середньоквадратичні відхилення $\sigma_{tg\varphi}$, σ_c , коефіцієнт кореляції $r_{tg\varphi c}$. Визначається кореляційний момент $K_{tg\varphi c}$. Коефіцієнт варіації прийнято $C_v = 0,122$.

Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя $ptg\varphi$, розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище

параметрами $m_{tg\varphi}$, $\sigma_{tg\varphi}$ визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя $tg\varphi$. Визначаються параметри умовного закону розподілу $m_{tg\varphi c}$, $\sigma_{tg\varphi c}$. За відомою імовірністю величини питомого зчеплення pc , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення c , кПа.

Розглядається схема плоского поступального зсуву по нахилений поверхні. Обчислюється значення коефіцієнта стійкості на зсув, перекидання і спливання за формулами (3-5).

При кожному випробовуванні камера шлюзу вважається ненадійною при досягненні хоча б одного граничного стану. Розрахунок виконується методом статистичних випробовувань N разів. Кількість випробовувань, при яких $k < 1$, віднесена до загальної кількості випробовувань N і визначає величину ризику настання граничного стану камери шлюзу за весь строк служби.

Значення щорічної імовірності ризику руйнування камери шлюзу обчислюється за формулою

$$p = 1 - (1 - pr)^{\frac{1}{T}}, \quad (6)$$

де p – щорічна імовірність настання граничного стану;

pr – імовірність настання граничного стану за призначений строк служби;

T – призначений строк служби, рр.,

і виконується порівняння із допустимою величиною.

Результати розрахунків ризику виникнення аварій шлюзів гідровулів Дніпровського каскаду наведені в таблиці.

Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу. Межі довірчого інтервалу обчислені за формулами [33].

Таблиця

Результати комплексної оцінки імовірності вичерпання міцності, втрати стійкості, спливання камер шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас споруди	Кількість статистичних випробувань	Розрахункове значення імовірності настання граничного стану за призначений строк служби T, р.	Розрахункове значення щорічної імовірності настання граничного стану, р. ⁻¹	Допустиме значення імовірності настання граничного стану, р. ⁻¹
Камера трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла				
СС-3	$6,88 \times 10^5$	$2,23 \times 10^{-3}$	$2,23 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}
Камера однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла				
СС-3	$8,76 \times 10^5$	$1,75 \times 10^{-3}$	$1,75 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}
Камера шлюзу Кременчуцького гідровузла				
СС-3	$8,03 \times 10^5$	$1,91 \times 10^{-3}$	$1,91 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}

Висновки. Удосконалено методику оцінки надійності камер шлюзів на скельовій основі за критеріями втрати стійкості проти зсуву, перекидання і всплиття. Ураховано імовірнісний характер навантажень і впливів, механічних властивостей основи, кореляційні

залежності між природними факторами. Методика апробована на прикладі камер шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду. Результати можуть застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів.

Список використаних джерел

1. Гідротехнічні споруди. Основні положення [Текст] : ДБН В.2.4–3:2010. — К. : Мінрегіонбуд України, Державне підприємство “Укрархбудінформ”, 2010. — 37 с.
2. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст] : ДБН В.1.2–14–2009. — К. : Мінрегіонбуд України, Державне підприємство “Укрархбудінформ”, 2009. — 37 с.
3. Вайнберг, А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений [Текст] / А. И. Вайнберг. — Харьков: Тяжпромавтоматика, 2008. — 304 с.
4. Финагенов, О. М. К вопросу оценки эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений [Текст] / О. М. Финагенов, С. Г. Шульман // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 1999. — Т. 234. — С. 7—15.
5. Системный анализ надежности водопроводящих трактов ГЭС [Текст] / Е. М. Дзюбанов, Н. Ю. Дмитриев, М. П. Левина [и др.] // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 1997. — Т. 233. — С. 47—54.

6. Лентяев, Л. Д. Обеспечение надежности водосбросных и водопропускных сооружений крупных гидроузлов [Текст] / Л. Д. Лентяев, Л. В. Смирнов // Гидротехническое строительство. — 1983. — №8. — С. 40—42.
7. Мирцхулава, Ц. Е. Анализ безопасности и надежности водопропускных сооружений [Текст] / Ц. Е. Мирцхулава // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 1985. — С. 81—84.
8. Стефанишин, Д. В. К оценке надежности водопропускных сооружений гидроузлов [Текст] / Д. В. Стефанишин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 2000. — Т. 236. — С. 77—82.
9. Векслер, А. Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений [Текст] / А. Б. Векслер, Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин. — СПб.: Изд-во ОАО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2002. — 589 с.
10. Arunraj N.S., Mandal S., Maiti J. Modeling uncertainty in risk assessment: An integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation [Text] / N.S. Arunraj, S. Mandal, J. Maiti / Accident Analysis & Prevention. — 2013. — Vol. 55. — P. 242—255.
11. Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis [Text] / L. Altarejos-García, I. Escuder-Bueno, A. Serrano-Lombillo [and others] // Structural Safety. — 2012. — Vol. 36—37. — P. 1—13.
12. Methodology for a probabilistic analysis of an RCC gravity dam construction. Modelling of temperature, hydration degree and ageing degree fields [Text] / A. Gaspar, F. Lopez-Caballero, A. Modaressi-Farahmand-Razavi [and others] // Engineering Structures. — 2014. — Vol. 65. — P. 99—110.
13. Alessio Lupoi. A probabilistic method for the seismic assessment of existing concrete gravity dams [Text] / Alessio Lupoi, Carlo Callari // Structure and Infrastructure Engineering. — 2012. — Vol. 8. — Issue 10. — P. 985—998.
14. A continuous Bayesian network for earth dams' risk assessment: methodology and quantification [Text] / O. Morales-Nápoles, D. J. Delgado-Hernández, D. De-León-Escobedo [and others] // Structure and Infrastructure Engineering. — 2014. — Vol. 10. — Issue 5. — P. 589—603.
15. Su H. Z. Optimization of reinforcement strategies for dangerous dams considering time-average system failure probability and benefit–cost ratio using a life quality index [Text] / H. Z. Su, J. Hu, Z. P. Wen // Natural hazards. — 2013. — Vol. 65. — Issue 1. — P. 799—817.
16. Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis and reliability methods—application to hazards studies [Text] / L. Peyras, C. Carvajal, H. Felix [and others] // European Journal of Environmental and Civil Engineering. — 2012. — Vol. 16. — Issue 7. — P. 795—817.
17. A reliability-based approach to evaluating the stability of high rockfill dams using a nonlinear shear strength criterion [Text] / Z. Y. Wu, Y. L. Li, J. K. Chen [and others] // Computers and Geotechnics. — 2013. — Vol. 51. — P. 42—49.
18. Penalty function-based method for obtaining a reliability indicator of gravity dam stability [Text] / Y. Li, Y. Sun, B. Li [and others] // Computers and Geotechnics. — 2016. — Vol. 81. — P. 19—25.
19. Cho S. E. Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation [Text] / S. E. Cho // Engineering Geology. — 2012. — Vol. 133—134(0). — P. 30—39.
20. Calamak M. Probabilistic assessment of slope stability for earth-fill dams having random soil parameters [Text] / M. Calamak, A.M. Yanmaz // 11th National Conference on Hydraulics in Civil Engineering & 5th International Symposium on Hydraulic Structures: Hydraulic Structures and Society-Engineering Challenges and Extremes. — Engineers Australia: 2014. — P. 34.

21. Alembagheri M. Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams [Text] / M. Alembagheri, M. Seyedkazemi // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. — 2015. — Vol. 44. — Issue 1. — P. 41—58.
22. Мозговий, А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва*. — Харків: ХДТУБА, 2011. — Вип. 65. — С. 364–370.
23. Мозговий, А. О. Основні передумови оцінки безпечності і надійності каскадів гідровузлів [Текст] / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва*. — Харків: ХДТУБА, 2009. — Вип. 54. — С.272–277.
24. Мозговий, А. О. Загальні підходи щодо керування ризиком втрати надійності каскаду гідровузлів під час проходження катастрофічного паводку [Текст] : матеріали VI Міжнар. наук. конф. "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд" / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва*. — Харків: ХНУБА, 2013. — Вип. 73. — С. 531–536.
25. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду [Текст] / А. В. Яцик, А. І. Томільцева, М. Г. Томільцев [та ін.]; за ред. А. В. Яцика. — К. : Генеза, 2003. — 176 с.
26. Мозговий, А. О. Аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу температурних впливів за статистичними даними [Текст] / А. О. Мозговий // *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць*. — Рівне: Вид-во НУВГП, 2011. — Вип. 39. — С. 98–102.
27. Мозговий, А. О. Аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України. Вибір параметрів функції розподілу інтенсивності землетрусів за статистичними даними [Текст] / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва*. — Харків: ХДТУБА, 2010. — Вип. 58. — С. 264–270.
28. Idriss, I. M. Evaluating Seismic Risk In Engineering Practice [Text] / I. M. Idriss // *Proc. Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. — San Fransisco, 1985. — Vol. 1. — P. 255-320.
29. Будівництво у сейсмічних районах України [Текст] : ДБН В.1.1-12:2014. — К. : Мінрегіон України, Державне підприємство "Укрархбудінформ", 2014. — 110 с.
30. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений [Текст] : пособие к разд. 5: Гидротехнические сооружения СНиП II-7-81. П 17-85. — Л. : Типография ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1986. — 310 с.
31. Основания гидротехнических сооружений [Текст] : СНиП 2.02.02-85. — М. : Госстрой СССР, ЦИТП Госстроя СССР, 1988. — 48 с.
32. Проектирование оснований гидротехнических сооружений [Текст] : пособие к СНиП II-16-76. П 13-83. — Л. : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1984. — 402 с.
33. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. — 5-е изд., стер. — М. : Высшая школа, 1998. — 576 с.

Мозговий Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057)706-18-99. E-mail: mozgovoyandrey@i.ua.

Andriy O. Mozgovuy, Ph.D, Associate Professor, Department of Hydro Construction Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (057)706-18-99. E-mail: mozgovoyandrey@i.ua.

Стаття прийнята 19.12.2017 р.

УДК 691.12:691.3

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА АРБОЛИТОБЕТОНА

Д-р техн. наук Е. С. Шинкевич, Д. С. Линник (ОГАСА)

БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ АРБОЛІТОБЕТОНУ

Д-р техн. наук О. С. Шинкевич, Д. С. Линник (ОДАБА)

MULTIPARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF PAPERCRETE

Dr. sc. Sciences E.S. Shinkevich, D.S. Linnik

Целью исследования является получение арболитобетона пониженной плотности. Выполнен выбор и обоснование вида вяжущего для арболитобетона, систематизация полученных данных. Подобрано оптимальное соотношение компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее». Сделан подбор оптимального соотношения между фракциями органического наполнителя. Проведена многопараметрическая оптимизация состава арболитобетона плотностью $\rho < 400 \text{ кг/м}^3$ методами математического моделирования по показателям прочности и средней плотности с учетом состава композиционного гипсового вяжущего, фракционного состава костры и соотношения компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее». Оптимальные составы арболитобетона обеспечивают класс прочности В0,35 и В0,5 плотностью $\rho \leq 300 \text{ кг/м}^3$.

Ключевые слова: *экостроительство, экоматериал, энергосбережение, наполнитель, костра, арболитобетон, модель, оптимизация, фракция, состав.*

Метою дослідження є отримання арболітобетону зниженої щільності. Виконано вибір і обґрунтування виду в'язучого для арболітобетону, систематизація отриманих даних. Підібране оптимальне співвідношення компонентів у системі «органічний заповнювач – в'язуче». Зроблено підбір оптимального співвідношення між фракціями органічного заповнювача. Проведена багатопараметрична оптимізація складу арболітобетону щільністю $\rho < 400 \text{ кг/м}^3$ методами математичного моделювання за показниками міцності та середньої щільності з урахуванням складу композиційного гіпсового в'язучого, фракційного складу костриці та співвідношення компонентів у системі «органічний заповнювач – в'язуче». Оптимальні склади арболітобетону забезпечують клас міцності В0,35 та В0,5 щільністю $\rho \leq 300 \text{ кг/м}^3$.

Ключові слова: *екобудівництво, екоматеріал, енергозбереження, заповнювач, костриця, арболітобетон, модель, оптимізація, фракція, склад.*

In the article provides a brief overview of the specific features of cellulose-containing aggregates of plant origin. The degree of influence of these features of cellulose-containing aggregates of plant origin on the processes of structure formation and the physical and mechanical properties of arbolitic concrete is shown. The aim of the study is to obtain an arbolite concrete of reduced density. The choice and justification of the type of binder for arbolitic concrete, the systematization of the obtained data was made. Composites based on cellulose-containing aggregate with various kinds of binder are analyzed. The optimum ratio of components in the system "organic filler - astringent". The selection of the optimal ratio between fractions of organic aggregate is made. Based on the results of experimental data, ES models of the influence of the

fractional composition of organic aggregate on the properties of arbolitic concrete are calculated. The multiparametric optimization of the composition of arbolitic concrete with a density $\rho < 400 \text{ kg / m}^3$ was carried out using mathematical modeling methods for strength and average density parameters, taking into account the composition of the composite gypsum binder, the fractional composition of the bonfire, and the ratio of the components in the "organic filler-binder" system. The optimal compositions of ablit-concrete provide a strength class of B0.35 and B0.5 with a density $\rho \leq 300 \text{ kg / m}^3$ for these strength classes for arbolitic concrete. The developed compositions of arbolitic concrete on the complex of quality criteria are optimized.

Keyword: green building, eco-material, energy saving, filler, bonfire, arbolitobeton, model, optimization, fraction, composition.

Вступление. Экостроительство положительно влияет и создает комфорт для человека и окружающей среды. Одним из основных критериев создания и выбора материалов для экостроительства с точки зрения «стабильного развития среды обитания» является прохождение экоматериалом полного жизненного цикла от создания до утилизации с минимальным ущербом для окружающей среды и человека. Актуальной задачей строительной отрасли является разработка ресурсосберегающих технологий, которые обеспечивают экономию топливно-сырьевых материалов и улучшают технико-экономические показатели работы предприятия. Не менее актуальной задачей является получение экологически безопасных, низкоэнергетических и комфортных строительных материалов. Одним из таких видов экоматериалов является арболит – легкий бетон на основе различных видов органических целлюлозных заполнителей.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время научный и практический интерес к арболитобетону, как к экологически чистому, энергосберегающему и комфортному материалу, наблюдается в таких странах: США, Канада, Великобритания, Австрия, Франция, Швеция, Финляндия, Украина, Япония и др. Исследования отечественных и зарубежных ученых посвящены вопросам структурообразования, технологии получения и оптимизации составов арболитобетонных материалов. Проблема получения качественных изделий из

арболитобетона заключается в подборе вида вяжущего, оптимизации его компонентов, исследовании влияния фракционного состава органического заполнителя на свойства арболитобетона. Анализ литературных источников показал, что обычные типы вяжущего – цемент, известь – заменяются в работах на альтернативные материалы, такие как MgO и цеолит [1–7]. Экспериментальные результаты механических свойств арболитобетона показывают, что использование цеолита как замена цемента не обеспечивает высокую механическую прочность арболитобетона, но оксид магния является подходящей заменой для цемента в легких композитах [5–7]. Однако плотность полученных изделий довольно высокая и составляет 790–1200 кг/м³. Использование извести в качестве вяжущего не обеспечивает высокой прочности при сжатии и составляет 0,3–0,4 МПа при плотности 300 кг/м³ [1–4].

Что касается вопроса подбора и оптимизации фракционного состава органического заполнителя, то в литературных источниках отсутствует информация о подборе фракционного состава костры с помощью метода экспериментально-статистического моделирования. Обычно авторами используются усредненные значения длины частиц костры, рассчитанные по гранулометрическому анализу [4, 6, 7]. Таким образом, теряется важный объем данных, учитывающий не только влияние каждой фракции отдельно на свойства, но и их синергизм.

Определение цели и задачи исследования. Цель исследования – получение арболитобетона пониженной плотности. Задачи исследования: 1) выбор и обоснование вида вяжущего для арболитобетона, систематизация полученных данных; 2) подбор оптимального соотношения компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее»; 3) подбор оптимального соотношения между фракциями органического наполнителя; 4) многопараметрическая оптимизация состава арболитобетона плотностью $\rho < 400 \text{ кг/м}^3$.

Основная часть исследования.

Одним из способов получения композиционных материалов с заданными свойствами является оптимизация их состава. Оптимизация в настоящем исследовании проводится по экспериментально-статистическим (ЭС) моделям [8]. Важными аспектами любой оптимизационной задачи является улучшение свойств, уменьшение расхода дорогостоящих компонентов и снижение себестоимости конечной продукции. Арболит – это сложный композит, состоящий из системы вяжущего и органического наполнителя. Оптимизация состава арболита представляет собой решение многих задач, поэтому рационально оптимизацию его состава проводить поэтапно.

На первом этапе исследования обоснован подбор основных компонентов вяжущего, добавок и выполнен подбор состава вяжущего. В поисковых исследованиях по подбору состава вяжущего для арболитобетона предусмотрен широкий набор вариантов. Выбор вариантов исходил из соображений, связанных с определенными ограничениями и начальными условиями, продиктованными требованиями технологичности получения композита, затрат на исходные материалы, прогнозируемыми производственными затратами, длительностью технологического цикла получения строительных изделий из композита и др. В составе этих

требований особое место уделяется вопросам экологичности и биостойкости [9]. В поисковых экспериментальных исследованиях использованы сырьевые материалы: цемент, гипс, известь, магнезиальное вяжущее, жидкое натриевое стекло [10–11].

На основании проведенных поисковых исследований для различных видов и вариантов вяжущего можно говорить о достоинствах и недостатках каждого вида вяжущего. Цемент широко используется как основа для производства арболита. Составы на цементном вяжущем показывают высокую прочность и стойкость к влагопеременным воздействиям, но имеют повышенную плотность и требуют обработки целлюлозного наполнителя минерализаторами. Известь широко используется при производстве арболита за рубежом. Изделия на извести имеют низкую плотность, достаточную прочность. Недостаток известкового вяжущего – медленный набор марочной прочности изделий. Известны разработки, в которых в качестве вяжущего для арболита применялось жидкое стекло. Достоинством этого вяжущего является то, что оно хорошо связывается с кострой и в сочетании с добавками обеспечивает материалу с таким наполнителем необходимую биостойкость, огнестойкость и достаточную механическую прочность. На его твердение не оказывают влияния сахара и реактивные вещества, находящиеся в древесине. Однако данное вяжущее обладает высокой стоимостью. Гипс является наиболее перспективным материалом для изделий из арболитобетона. Композиты на основе гипса имеют хорошее сцепление костры с вяжущим; прочностные показатели удовлетворительны; распалубочная прочность достигается через 3–5 ч (в зависимости от марки гипса, сроков схватывания, водогипсового отношения); проблемы с сахарами для этого вида вяжущего не так актуальны. После

твердения композит на гипсе характеризуется относительно невысокой влажностью. Гипс, обладая коротким сроком схватывания, ограничивает время формирования материала. Для замедления начала схватывания потребовалось введение добавок – замедлителей гидратации гипса.

На втором этапе исследования проведен подбор оптимального соотношения компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее», которое обеспечивает получение арболитобетона плотностью ниже минимально нормированной в стандартах для заданной прочности. Условия задачи второго этапа исследования приведены в таблице.

На рис. 1, 2 представлены графики изменения физико-механических свойств арболитобетона в зависимости от содержания вяжущего по отношению к содержанию органического наполнителя.

Из графиков, представленных на рис. 1, 2, можно сделать заключение, что при соотношении органического заполнителя к вяжущему от 1:1,5 до 1:1 (мас.ч.) плотность арболитобетона ρ – 270÷300 кг/м³, $R_{сж}$ – 0,25÷0,50 МПа, W_o – 55÷35 %. Таким образом, в диапазоне исследуемых составов по соотношению компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее» прочность изменяется до 1,7 раз. При содержании вяжущего в смеси от 1,4 до 2 ощутимо уменьшается водопоглощение по объему – до 30 %. В результате для дальнейших экспериментальных исследований рекомендованы соотношения компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее» 1:1,4 и 1:1,5. Соотношение 1:1,5 органической части к неорганической берется за основу при подборе соотношения фракционного состава органического наполнителя, который обеспечит плотность $\rho < 400$ кг/м³.

Таблица

Условия оптимизации системы «вяжущее – органический наполнитель»

Свойство	Нормированные уровни свойств по ДСТУ Б В.2.7.-271:2011	Заданные уровни свойств (марка)
Прочность при сжатии, МПа (Класс В)	В 0,35 при $\rho=400-450$ кг/м ³	$R_{сж} \geq 0,45$ МПа (В0,35)
Плотность ρ , кг/м ³	400–500 кг/м ³	$\rho \leq 300$ кг/м ³
Водопоглощение по объему W_o , %	–	$W_o \rightarrow min$

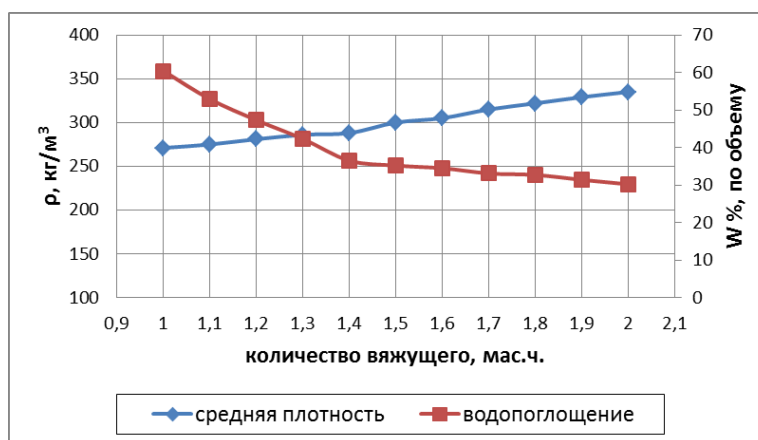


Рис. 1. Зависимость средней плотности и водопоглощения от количества вяжущего в арболитовых образцах

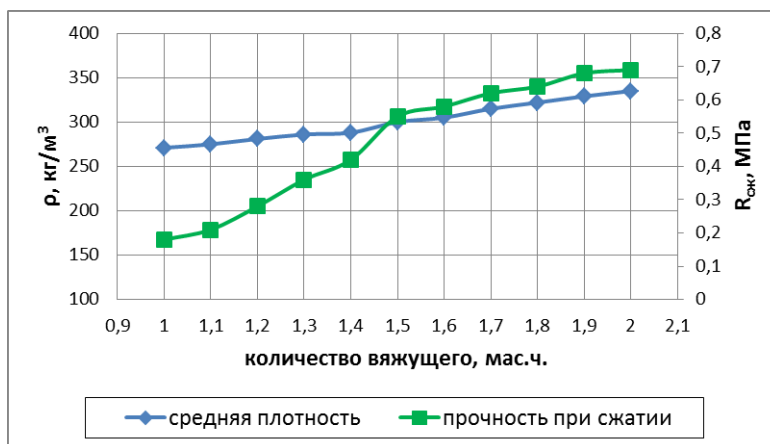


Рис. 2. Залежність середньої щільності та міцності при сжатті від кількості вяжущого в арболитових зразках

На третьому етапі дослідження проведена оптимізація фракційного складу органічного заповнювача. Експеримент по оптимізації фракційного складу органічного заповнювача поставлений по симплекс-решетчатому плану Шеффе для сумішей. Розрахунок ЕС моделей, візуалізація графічної частини виконані в програмі STATISTICA. В експерименті варіювалось три незалежних фактора: велика фракція органічного заповнювача розміром $X = 10\text{--}20$ мм, середня фракція органічного заповнювача розміром $Y = 5\text{--}10$ мм, мала фракція органічного заповнювача розміром $Z = 2,5\text{--}5$ мм. Фракції органічного заповнювача більше 20 мм і менше 2,5 мм не аналізувались в силу їх

незначительного нормованого вмісту в заповнювачі. Оцінка фракційного складу органічного заповнювача визначалась по показателям частинних залишків на ситах в відповідності до стандарту (ДСТУ Б В.2.7-271:2011 «Арболит і вироби з нього; загальні технічні умови»).

В результаті реалізації експерименту отримані трифакторні сумішні ЕС моделі, що описують зміну міцності при сжатті та щільності під впливом фракційного складу заповнювача. Залежність міцності на сжатті від співвідношення кількості різних фракцій органічного заповнювача описується моделлю 1:

$$R_{сжк} = 0,47 * x + 0,5 * y + 0,46 * z - 0,02 * x * y - 0,1 * x * z + 0,16 * y * z + 1,32 * x * y * z \quad (1)$$

Залежність щільності від співвідношення кількості різних фракцій

органічного заповнювача описується моделлю 2:

$$\rho = 285 * x + 310 * y + 314 * z + 18 * x * y + 30 * x * z - 3,9999 * y * z + 57 * x * y * z \quad (2)$$

По ЕС моделях (1) і (2) проаналізовано вплив фракційного складу органічного заповнювача на властивості арболитобетону. Оцінка впливу кожного фактора (фракція органічного

заповнювача) на відповідне значення властивостей (міцність при сжатті, щільність) виконувалась по графікам, представленим на рис. 3, 4.

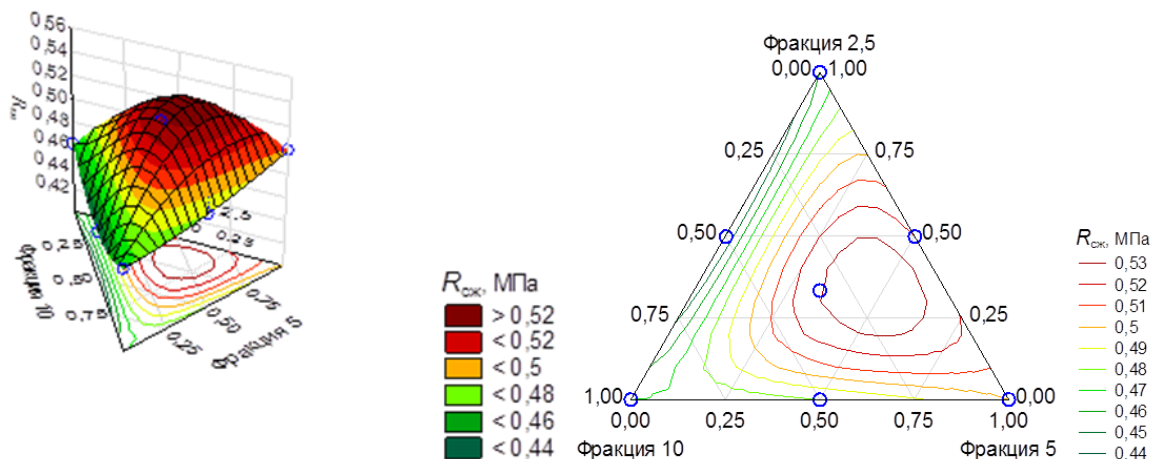


Рис. 3. Влияние фракционного состава органического заполнителя на предел прочности при сжатии арболитобетона

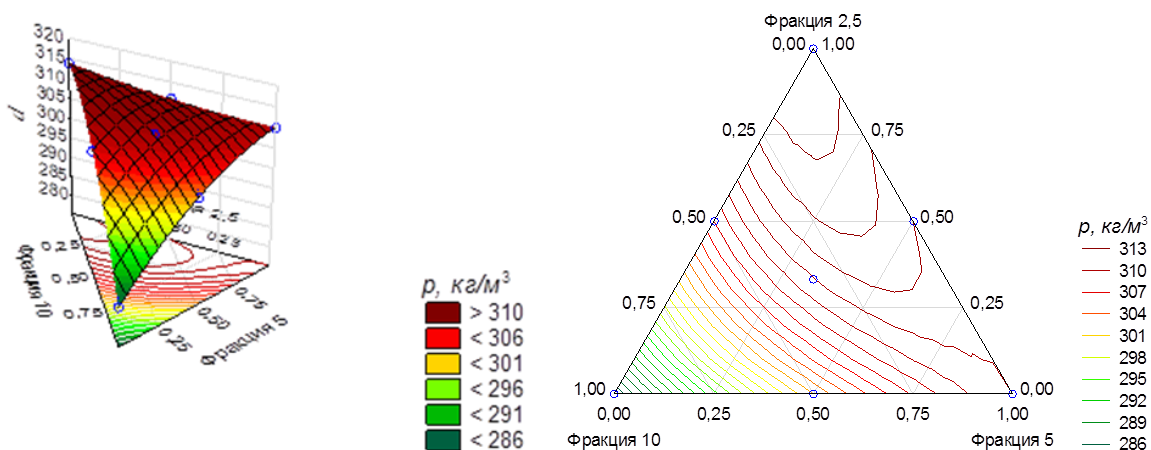


Рис. 4. Влияние фракционного состава органического заполнителя на плотность арболитобетона

Анализ графиков показывает, что при содержании крупной фракции (размером ≥ 10 мм) в количестве от 50 до 100 % и содержании средней фракции (размером ≥ 5 мм) в количестве от 0 до 50 % обеспечивается значительное снижение плотности – до 285 кг/м^3 . Влияние мелкой фракции (размером $\geq 2,5$ мм) на прочность незначительно.

На заключительном этапе исследований по результатам предыдущих трех этапов проведена многопараметрическая оптимизация состава арболитобетона. Результаты многопараметрической

оптимизации фракционного состава органического заполнителя, а также область расположения фракционного состава в рекомендованных по стандартам пределах по полным остаткам на контрольных ситах проиллюстрированы на треугольной диаграмме (рис. 5).

На диаграмме выделена (незаштрихованная) область рекомендуемых составов по показателям прочности и средней плотности с учетом состава композиционного гипсового вяжущего, фракционного состава органического заполнителя и соотношения компонентов в системе

«органический наполнитель – вяжущее». Оптимальные составы обеспечивают класс прочности В0,35 и В0,5 плотностью $\rho \leq 300 \text{ кг/м}^3$, что ниже нормированных

значений плотности 400–450 кг/м^3 для указанных классов прочности арболитобетон.

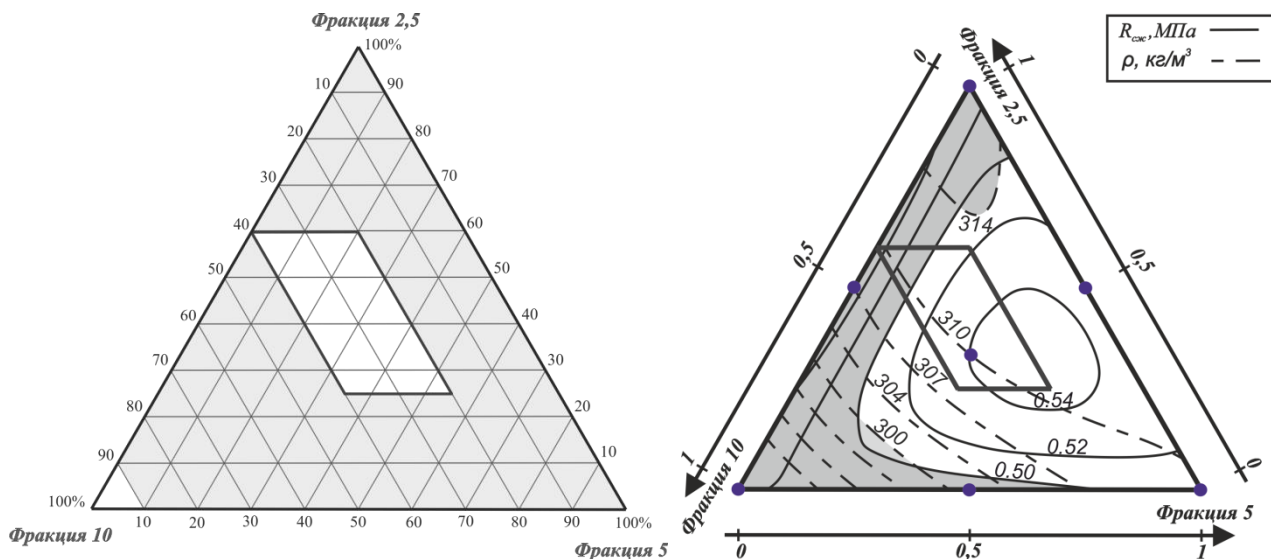


Рис. 5. Диаграмма области расположения фракционного состава в рекомендованных по стандартам пределах и многопараметрической оптимизации фракционного состава органического заполнителя для арболитобетона

Выводы. Проведен подбор соотношения количества органического заполнителя и композиционного гипсового вяжущего. Показано, что оптимальным является соотношение вяжущее – органический наполнитель, равное 1:1,5. Такой состав обеспечивает получение арболитобетона плотностью 300 кг/м^3 , прочностью при сжатии не менее 0,5 МПа.

По результатам экспериментальных данных рассчитаны ЭС модели влияния фракционного состава органического заполнителя на свойства арболитобетона. Показано, что при содержании крупной фракции в количестве от 50 до 100 % и содержании средней фракции в количестве от 0 до 50 %, обеспечивается значительное снижение плотности – до 285 кг/м^3 .

Влияние мелкой фракции на прочность незначительно.

Проведена многопараметрическая оптимизация состава арболитобетона по показателям прочности и средней плотности с учетом состава композиционного гипсового вяжущего, фракционного состава органического заполнителя и соотношения компонентов в системе «органический наполнитель – вяжущее». Оптимальные составы обеспечивают класс прочности В0,35 и В0,5 плотностью 300–312 кг/м^3 , что ниже нормированных значений плотности 400–450 кг/м^3 для указанных классов по прочности для арболитобетон.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение биостойкости [12] и огнестойкости [13–14] арболитобетона.

Список использованных источников

1. Colin MacDougall, Natural Building Materials in Mainstream Construction: Lessons from the U. K. [Text] // Journal of Green Building: Summer. – 2008. – Vol. 3, No. 3. – P. 1–14.
2. Placet V. Characterization of the thermo-mechanical behaviour of hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites [Text] // Compos. Part A 40. – 2009. – P. 1111.
3. D. Sedan, S. Pagnoux, A. Smith, T. Chotard, Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction [Text] // J. Eur. Ceram. Soc. 28, 2008. – P. 183.
4. P. Dalmay, A. Smith, T. Chotard, P. Sahay-Turner, V. Gloaguen, P. Krausz, Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibers on the properties of set gypsum [Text] // J. Mater. Sci. 45, 2010. – P. 793.
5. Stevulova N., Kidalova L. Lightweight Composites Containing Hemp Hurds [Text] // Procidea engineering. – 2013. – Nr. 65. – P. 69.-74.
6. L. Arnaud, E. Gourlay, Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes [Text] // Construction and Building Materials 28. – 2012. – P. 50.
7. Kidalova L, Stevulova N, Terpakova E, Helcman M. Effective utilization of alternative materials in lightweight composites [Text] // Chem. Eng. Transac. – 2011. – No. 25. – P. 1079-1084.
8. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов [Текст] / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Я. П. Иванов, И. И. Николов. – К.: Будивельник, 1989. – 240 с.
9. Линник, Д. С. Повышение биостойкости костробретона добавкой пирогенного микрокремнезема, модифицированного соединениями серебра, меди и цинка [Текст] / В. И. Юсипчук, Д. С. Линник, Е. С. Шинкевич // Вестник ОГАСА. – Одесса, 2015. – Вып. 60. – С. 370-376.
10. Оптимізація складів сухих будівельних сумішей на основі експериментально-статистичних моделей [Текст] / О. С. Шинкевич, А. Б. Тимняк, Д. С. Лінник, А. А. Тертичний // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: наук.-техн. зб. – К., 2013. – Вып. 48. – С. 179-183.
11. Линник, Д. С. Экостроительство из арболитобетона на основе композиционного гипсового вяжущего [Текст] / Д. С. Линник, Е. С. Шинкевич, В. И. Юсипчук // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка: наук.-техн. зб. – К., 2014. – Вып. 52. – С. 112-116.
12. Линник, Д. С. Влияние высокоактивной пуццолановой добавки на свойства композиционного гипсового вяжущего и арболитобетона на его основе [Текст] / Д. С. Линник, В. И. Юсипчук, Е. С. Шинкевич // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – Вып. 57. – С. 273-278.
13. Жартовський, В. М. Профілактика горіння целюлозовмісних матеріалів. Теорія та практика [Текст] / В. М. Жартовський, Ю. В. Цапко. – К., 2006. – 248 с.
14. ДБН В.1.1-7-2-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва [Текст]. – На заміну СНиП 2.01.02-85; введ. 2003-05-01. – вид. офіційне. – К.: УкрНДІПБ МНС України, 2003. – 59 с.

Шинкевич Олена Святославівна, д-р техн. наук, професор кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел: (067) 767-17-24.
E-mail: elena_shinkevich@ukr.net.

Линник Дмитро Сергійович, науковий співробітник кафедри процесів та апаратів у технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (067)558-90-73.
E-mail: fgg109m@gmail.com.

Shinkevish Elena, Dr. Sc. science of building materials Odessa State academy of building and architecture of city Odessa. Tel.: (067)767-17-24. E-mail: elena_shinkevich@ukr.net.
Linnik Dmitriy, Odessa State academy of building and architecture of city Odessa. Tel.: (067) 558-90-73.
E-mail: fgg109m@gmail.com.

Стаття прийнята 20.12.2017 р.

УДК 625.143.482:536.5

УДОСКНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ РЕЙОК ТА РЕЙКОВИХ ПЛІТЕЙ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ

Д-р техн. наук М. П. Ремарчук, канд. техн. наук О. І. Белорусов, асп. В. В. Тертичний

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЛЬСОВ И РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ

Д-р техн. наук. Н. П. Ремарчук, канд. техн. наук А. И. Белорусов, асп. В. В. Тертичный

IMPROVEMENT OF THE TEMPERATURE CONTROL METHOD FOR RAILS AND RAILS STRINGS OF THE CONTINUOUS WELDED TRACK

Doct. of techn. sciences M. P. Remarchuk, cand. of techn. sciences O. I. Belorusov, graduate student V. V. Tertychniy

На підставі аналізу створення нормативної бази дослідження улаштування, ремонту та поточного утримання безстикової колії досліджено сучасні методики контролю температури рейок та відзначені їхні недоліки та похибки, для усунення яких запропоновано нову методику термометричних досліджень на спеціальному дослідному стенді, який має максимально відтворювати можливі природно-кліматичні умови експлуатації рейкових плітей.

Ключові слова: безстикова колія, температура рейок, термометричні дослідження, умови експлуатації, середньооб'ємна температура.

На основе анализа создания нормативной базы исследования устройства, ремонта и текущего содержания бесстыкового пути исследованы современные методики контроля температуры рельсов и рельсовых плетей и определены их недостатки и погрешности, для устранения которых предложено новую методику термометрических исследований на специальном опытном стенде, который должен максимально воспроизводить возможные природно-климатические условия эксплуатации рельсовых плетей.

Ключевые слова: бесстыковой путь, температура рельсов, термометрические исследования, условия эксплуатации, среднеобъемная температура.

Modern methods of rail temperature control were studied based on the analysis of the existing regulations regarding arrangement, repair and routine maintenance of continuous welded track and their shortcomings and errors were determined; a new method of thermometric studies using the special test bench which is supposed to reconstruct as much as possible eventual climatic operation conditions of strings of rails was proposed to eliminate those shortcomings and errors. The rails to be studied should be fastened at the bench using the rail fastenings on the semi-ties in the track bed with the dimensions in accordance with the applicable regulations, on the roadbed, for the most reliable reconstruction of the heat exchange processes between the air, the track bed surface and the rail fastenings. At the first stage, KB-65 intermediate fastenings as the most common ones for continuous welded track are supposed to be used as fastenings, and KPP-5 fastenings are supposed to be used further.

Keywords: continuous welded track, rail temperature, thermometric studies, operating conditions, average volumetric temperature.

Вступ. На сучасному етапі розвитку технології укладання, ремонту та поточного утримання безстикової колії, за наявності встановленої нормативними документами методики виконання вимірювання температури рейок та рейкових плітей [1], температура рейки або рейкової пліті вимірюється в одному перерізі всередині рейкового темплету чи рейкової рубки довжиною 1,5 м за допомогою рейкових термометрів чи датчиків для вимірювання температури. Температура повітря на спеціальних метеорологічних стендах вимірюється метеорологічним термометром (ТМ), електричним датчиком вимірювання температури повітря (ДТ) та датчиком сонячного сяння (ДСС). У більшості країн світу саме через складність урахування великої кількості змінних природно-кліматичних факторів, ландшафтних особливостей (насип, виїмка) та просторової орієнтації по сторонах світу рейкових плітей (орієнтація за широтою чи меридіаном) використовують вірогідно-статистичні методи прогнозування температури повітря в тому чи іншому регіоні експлуатації безстикової колії та для визначення температури рейкових плітей додають постійний доданок до температури повітря (Δt), який для залізниць СНД та України становить постійну величину $\Delta t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ незалежно від значення температури повітря, але при позитивних її показниках. Це закріплено в основному нормативному документі, який саме регламентує всі вимоги до улаштування, укладання, ремонту та поточного утримання безстикової колії [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для забезпечення необхідної стійкості та міцності безстикової колії на дослідному полігоні, що розташований на експериментальному випробувальному кільці ст. Щербінка (Московська залізниця, МПС РФ), у 1960-х роках було створено дослідний стенд для проведення досліджень стійкості безстикової колії, які стали основою для створення всіх існуючих

на залізницях СНД та України нормативів, що забезпечують безпечність виконання всіх колійних робіт на безстиковій колії й температурні умови укладання та експлуатації безстикових рейкових плітей для будь-яких значень радіусів кривих. Головна особливість проведених наукових досліджень полягає в тому, що нагрівання дослідної ділянки колії здійснювали електричним струмом від спеціально призначених електричних генераторів, що забезпечувало рівномірне нагрівання рейок як по довжині, так і в поперечному перерізі, що дало змогу отримати достовірні дані про температуру рейкових плітей завдяки контролю саме температури поверхні рейки в будь-якій точці перерізу. Але виконані дослідження вченими МІТУ [3], ВНДІЗТ [4] та іншими вченими [5–9] довели, що температура рейки значно залежить від багатьох природно-кліматичних факторів та орієнтації рейок (за широтою або меридіаном) і завжди відрізняється від температури повітря в бік її завищення або в бік заниження залежно від орієнтації, часу світового дня (у ранкові години, опівдні або вечірні години) та пори року.

Мета та завдання дослідження. Через указані недоліки у визначенні температури рейок та рейкових плітей виникла необхідність проведення додаткових досліджень на спеціальному стенді, де рейки перебуватимуть в умовах, наближених максимально до тих, у яких вони експлуатуються. Для проведення досліджень слід використовувати сучасне тензометричне обладнання (датчики і тензометричні станції), що дасть змогу реєструвати результати деформацій у заданих точках перерізу з їх подальшою обробкою та аналізом на персональному комп'ютері.

Основний матеріал дослідження. У результаті досліджень, виконаних С. П. Першиним, С. А. Атанасовим та іншими вченими [3, 7–9], було встановлено, що температура рейок, які орієнтовані за широтою та за меридіанами, в полуденний

час відрізняється на 6–8 °С. На рис. 1–5 наведено особливості зміни температури

рейки залежно від її орієнтації, часу світового дня та пори року.

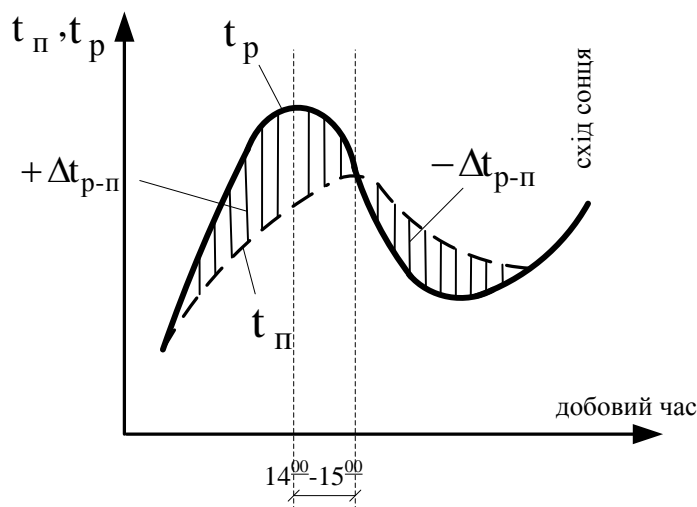


Рис. 1. Типові криві зміни температури рейки t_p та повітря t_n у літній період

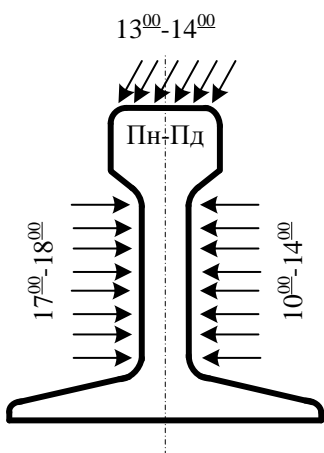


Рис. 2. Схема поглинання та відбивання тепла рейкою, яка розташована у напрямку північ – південь (Пн – Пд)

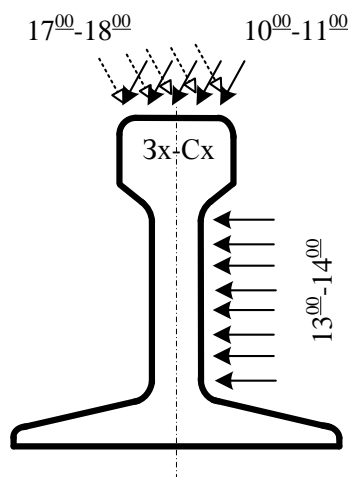


Рис. 3. Схема поглинання та відбивання тепла рейкою, яка розташована у напрямку захід – схід (Зх – Сх)

Крім того, більш детальні дослідження розподілу температури у перерізі рейки [10] свідчать про те, що різна просторова орієнтація рейок, наявність тіні від лісонасаджень, шляхопроводів та інших споруд [11], наявність нерівномірного обдування вітром

залежно від профілю земляного полотна (насип або виїмка) приводять до різного температурного обміну залізничної колії та навколишнього середовища. Таким чином, можливо зробити висновок, що температура рейки по довжині пліти та у поперечному перерізі не є однаковою.

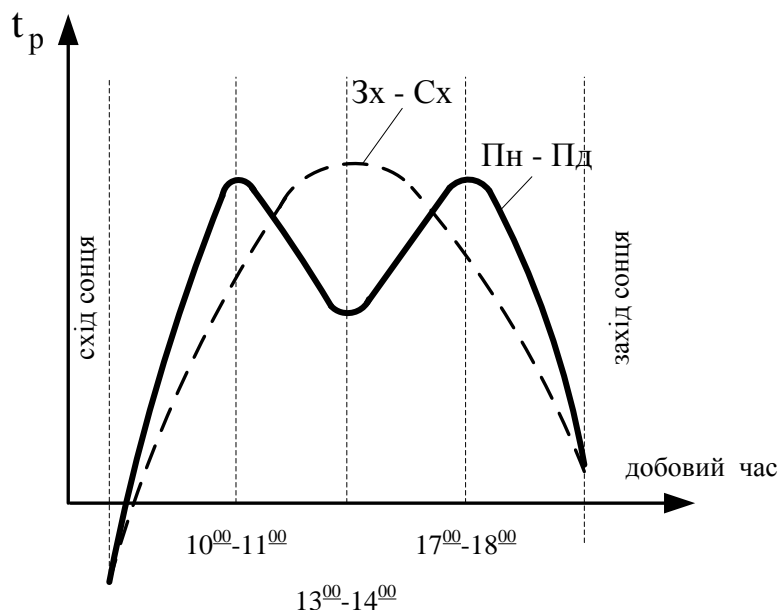


Рис. 4. Графіки зміни температури рейок у двох напрямках у денний час від сходу до заходу сонця

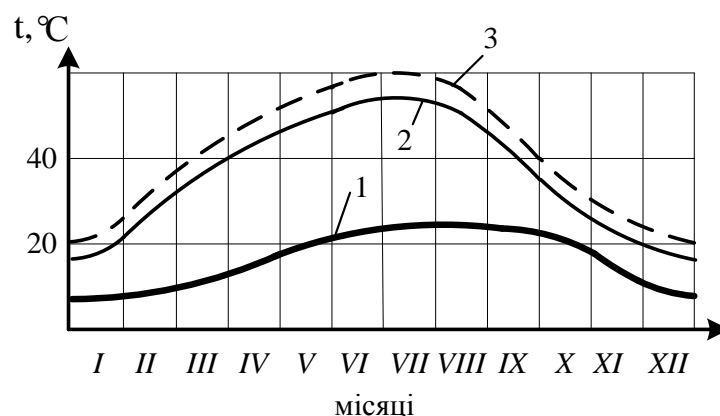


Рис. 5. Криві зміни температур протягом року за даними [7]:
 1 – $\max \Delta t$; 2 – $\max t_p$; 3 – $\max t_n + \max \Delta t$

Лабораторні дослідження безстикової колії в Німеччині показали, що при вертикальному опроміненні рейки інфрачервоним промінням температура голівки на $12\text{ }^\circ\text{C}$ вища, ніж температура низу підшви. При опроміненні під кутом до горизонту $45\text{ }^\circ\text{C}$ і меншим різниця температур лівої та правої кромок підшви доходила до $12\text{ }^\circ\text{C}$. Рейки, що мають орієнтацію $3x - Cx$, нагріваються на $8\text{ }^\circ\text{C}$ вище за рейки у напрямку $Пн - Пд$ [10]. Усі наведені факти свідчать про те, що не можна без проведення додаткових

досліджень на теперішній час визначити достовірно температуру рейки при вимірюванні її в одному перерізі звичайними рейковими термометрами за допомогою існуючих правил та методик [1, 2]. Дослідження, виконані вченими УкрДУЗТ [12, 14], дали змогу визначити, що залежно від температури повітря навколишнього середовища й температури нагрівання поверхні рейки існує певна функціональна залежність у часі зниження температури поверхні та загальної температури рейки від часу охолодження. Однак залишається

невідомим час повного вирівнювання нерівномірності нагрівання рейки по її перерізу, від початку якого починаються температурні деформації подовження нагрітої ділянки та суміжних з нею ділянок, які завдяки тепловому розповсюдженню нагрівалися.

Відсутність розробленої ефективної моделі практичного урахування більшості відомих факторів впливу (або найбільш впливових з усіх наведених) на визначення реальної температури рейок та рейкових плітей, яку можна за визначенням називати середньо-об'ємною температурою рейки, стало основним завданням цього наукового дослідження. Для досягнення цієї мети пропонується така методика експериментальних досліджень середньооб'ємної температури рейки, тобто такої, яка може бути визначена звичайним контактним або безконтактним рейковим термометром на поверхні рейки у визначеній точці перерізу, яка буде адекватна визначеній температурі рейки, обчисленій за абсолютною величиною температурного подовження рейкового темплета або рубки, почергово встановленої в одне з чотирьох широтних положень під час зовнішнього теплового впливу сонячного опромінювання. Для виключення теплових втрат, з метою максимального відтворення на дослідному зразку умов перебігу процесів теплопередачі, які відбуваються в рейкових плітях, усі рейкові рубки, довжина яких відповідає вимогам нормативного документа [1] та дорівнює 1,5 м, по торцях будуть надійно теплоізолювані наклеюванням пінополіуретанових торцевих накладок.

На дослідному стенді (рис. 6) планується розмістити 8 рейкових дослідних рубок, з яких чотири розташовуватимуться на насипах висотою 1 м, а інші чотири – у виїмках глибиною 1 м у чотирьох основних широтних напрямках просторової орієнтації (Пн – Пд, Сх – Зх, ПнСх – ПдЗх, ПдСх – ПнЗх). Усі рейкові рубки повинні бути закріплені у

рейкових скріпленнях, на напівшпалах, у баластному шарі, встановлених інструкцією [13] розмірів, на земляному полотні для максимально достовірного відтворення процесів теплового обміну між повітрям, поверхнею баластного шару та рейковими скріпленнями. Як скріплення передбачено на першому етапі застосовувати проміжне скріплення типу КБ-65 як найбільш поширене на полігоні безстикової колії, а на подальших етапах скріплення типу КПП-5, якщо буде встановлено суттєвий вплив типу скріплення на результати досліджень.

Температурні абсолютні подовження або скорочення рейкових рубок будуть контролюватися на перших етапах звичайними індикаторами годинникового типу (ІЧ-1), а в подальшому тензOMETричними датчиками переміщень для забезпечення синхронізації записів пересувань кінців рейкових рубок із записами датчиків температури, розташованих у 20 точках поперечного перерізу рейки всередині рейкових рубок (рис. 7).

За отриманими даними приладів, що фіксують переміщення торців рейкової рубки через кожну годину, починаючи з початкового моменту, коли температура рейки дорівнює температурі повітря після нічного охолодження, яке супроводжується повним перерозподілом тепла у поперечному перерізі та уздовж рейкової рубки, визначатимуть розрахунками фактичну середньо-об'ємну температуру рейки за такою формулою:

$$t_{p-co} = t_{p-0} + \frac{\Delta l t}{\alpha l p}, \quad (1)$$

де t_{p-co} – середньооб'ємна температура рейки;

t_{p-0} – початкова температура рейки, яка дорівнює температурі повітря перед сходом сонця;

Δl_t – абсолютне подовження рейки через годину після початку контролю та через кожну годину у подальшому, до заходу сонця;

l_p – довжина рейкової рубки;
 α – температурний коефіцієнт лінійного розширення рейкової сталі,
 $\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

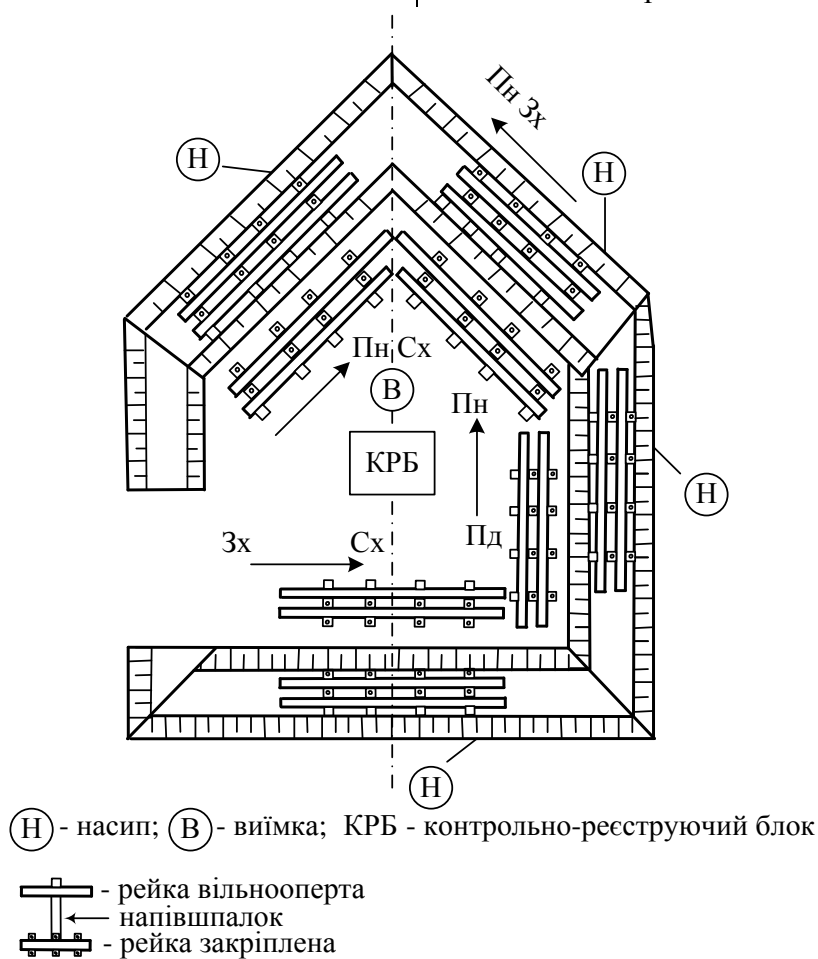


Рис. 6. Схема улаштування дослідного стенда для проведення термометричних досліджень

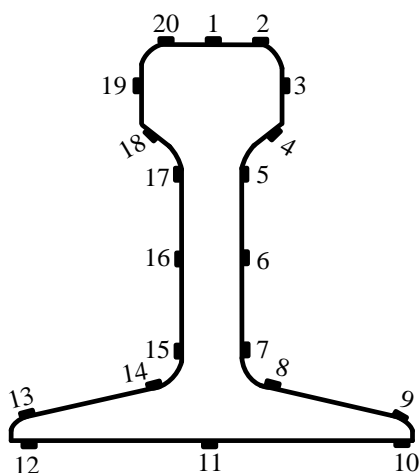


Рис. 7. Схема розміщення тензодатчиків у поперечному перерізі рейки

Висновки. Одночасний контроль температури поверхні рейки в усіх контрольних точках дасть змогу кожній години вимірювання визначати саме ті з них, у яких різниця між даними температурного контролю та підрахованими за допомогою формули буде мінімальною. Це дасть змогу для кожного з можливих положень рейки за просторовою орієнтацією отримувати номери точок контролю відповідно до рис. 7, які слід використовувати для отримання достовірних даних про температуру рейкової пліти, розташованої в аналогічній широтній

орієнтації, та профілю (насип чи виїмка) на місці експлуатації в діючій колії. Зазначене дасть змогу при плануванні колійних робіт ураховувати реальні значення температури, замість її приблизних значень, які на цей час призначають шляхом механічного додавання +20 °С до температури повітря.

На дослідному стенді можна визначати середньооб'ємну температуру вільно опертих на поверхню шпал, вивантажених заздалегідь рейок, призначених для укладання в колію, розрахункової довжини 1,5 м з термічною ізоляцією на торцях.

Список використаних джерел

1. Методичні вказівки щодо організації та виконання робіт з вимірювання температури рейок та рейкових плітей безстикової колії на залізницях України [Текст] / Укрзалізниця. – К., 1994. – 32 с.
2. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України [Текст] : ЦП-0266; затв. наказом 3 033-Ц від 01.02.2012. – К., 2012. – 150 с.
3. Першин, С. П. Температурные воздействия на рельсовый путь и их влияние на его устройство и условия эксплуатации [Текст] / С. П. Першин // Труды МИИТа. – М., 1969. – Вып. 318. – С. 3-135.
4. Бромберг, Е. М. Устойчивость бесстыкового пути [Текст] / Е. М. Бромберг. – М.: Транспорт, 1966. – 122 с.
5. Лященко, В. Н. Длинные рельсы и бесстыковой путь [Текст] / В. Н. Лященко. – Харьков: ХИИТ, 1961. – 111 с.
6. Бесстыковой путь и длинные рельсы [Текст] / В. Г. Альбрехт, Е. М. Бромберг, К. Е. Иванов, В. Н. Лященко [и др.]; под ред. д.т.н., проф. В. Г. Альбрехта. – М.: Транспорт, 1967. – 240 с.
7. Richards I. Weather and site effects on rail temperature [Text] // Ry Gaz. – N.12. – 1964.
8. Атанасов, С. А. Температурният режим на работа на релсите в безнаставов път [Текст] / С. А. Атанасов // ЖЕЛЕЗОПЪТЕН ТРАНСПОРТ. – 2007. – № 7/8. – С. 38-40.
9. Лепоев, М. Оптимални температурни интервали при палогане на безнаставов релсов път [Текст] / М. Лепоев, С. А. Атанасов // ЖЕЛЕЗОПЪТЕН ТРАНСПОРТ. – 2011. – № 9. – С. 42-44.
10. Арбузов, М. А. Вдосконалення системи контролю за поздовжньо-напруженим станом рейкових плітей безстикової колії [Текст] : дис.... канд. техн. наук: 05.22.06 / Арбузов Максим Анатолійович. – Дніпропетровськ, 2010. – 239 с.
11. Новакович, В. И. Безобидна ли тень на рельсовую плеть? [Текст] / В. И. Новакович, А. А. Бондаренко // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – № 8. – С. 28.
12. Разработка конструкции экспериментального устройства для искусственного создания расчетного температурного режима в процессе укладки рельсовых плетей бесстыкового пути [Текст] : отчет о НИР / Харьк. ин-т инж. ж.д. тр-та (ХИИТ); № ГР 01870097053. – Харьков, 1989. – 89 с.

13. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України [Текст] / Е. І. Даниленко, А. М. Орловський, М. Б. Курган та [ін.]. – К. : ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. – 56 с.

14. Determination of the primary technical parameters of the test bench for controlling the temperature of rails and rail bars of continuous welded rail / V. Tertychnyi, G. Vatulia, O. Belorusov, M. Kovalov // BulTrans'2017 – MATEC Web of Conferences 133, 03002 (2017). – <https://doi.org/10.1051/matecconf/201713303002>.

Ремарчук Микола Парфенійович, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел.: (057) 730-10-72. E-mail: remarchyk@ukr.net.

Белорусов Олександр Ігорович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-70. E-mail: bmg@kart.edu.ua.

Тертичний Віталій Вікторович, аспірант кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: bmg@kart.edu.ua.

Mykola Remarchuk, DSc in Technical Sciences, Professor, Construction, Track and Handling Machinery Department of Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: remarchyk@ukr.net. Tel.: (057) 730-10-72.

Oleksandr Belorusov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Track and Track Department of Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: bmg@kart.edu.ua. Tel.: (057) 730-10-70.

Vitalii Tertychnyi, postgraduate student of Building Mechanic and Hydraulic Department of Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-70.

Стаття прийнята 22.12.2017 р.

УДК 629.4.014.64

ОЦІНКА КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ УКРАЇНСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, асп. С. С. Яковлев

ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ СКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА УКРАИНСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Д-р техн. наук А. С. Крашенинин, асп. С. С. Яковлев

ESTIMATION OF COMPETITIVENESS OF SPEED MOBILE COMPOSITION OF UKRAINIAN PRODUCTION

Dr. of Tech. Sc. O. Krashenin, pg. S. Yakovlev

Здійснена оцінка вибору швидкісного рухомого складу (ШРС) для умов України за допомогою кваліметричного розрахунку якості техніки. Проведена оцінка швидкісного рухомого складу на підставі визначення вагових характеристик, досліджені споживчі та вартісні показники властивостей сучасних ШРС і проведений розрахунок їх індексів, визначено коефіцієнти конкурентоспроможності українського ШРС в порівнянні з ШРС інших країн.

***Ключові слова:** швидкісний рухомий склад (ШРС), кваліметричний розрахунок, конкурентоспроможність, експлуатація.*

Осуществлена оценка выбора скоростного подвижного состава (СПС) для условий Украины с помощью кваліметрического расчета качества техники. Проведена оценка скоростного подвижного состава на основании определения весовых характеристик, исследованы потребительские и стоимостные показатели свойств современных СПС и проведен расчет их индексов, определены коэффициенты конкурентоспособности украинского СПС по сравнению с СПС других стран.

Ключевые слова: скоростной подвижной состав (СПС), кваліметрический расчет, конкурентоспособность, эксплуатация.

In order to evaluate and make a decision on the choice of high-speed rolling stock (HRS) for Ukraine conditions, an assessment of the choice of the HRS was made using a qualitative calculation of the quality of the equipment. The estimation of high-speed rolling stock on the basis of weighting characteristics, consumer and cost indicators was carried out. The properties of modern HRS and their indicators, coefficients of competitiveness of Ukrainian HRS in comparison with HRS of other countries were studied. From the above calculations it was established that the domestic HRS Ekr1 "Tarpan" has a high level of competitiveness in comparison with many HRS of other countries. This determines the expediency of further development of the maintenance infrastructure of the HRS on the basis of its own production, gradually mastering the organization of maintenance of foreign HRS on its own repair facilities by repair personnel.

Keywords: high-speed rolling stock (HRS), qualitative calculation, competitiveness, exploitation.

Вступ. Сучасний ринок транспортних послуг потребує від залізниць використання швидкісного рухомого складу, що має бути конкурентоспроможним на європейському ринку залізничних послуг. Відповідно до цього для оцінки і ухвалення рішення щодо вибору швидкісного рухомого складу для умов України необхідно провести всебічне дослідження його конкурентоспроможності, споживчих та вартісних показників транспортних засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В сучасних умовах у західноєвропейських країнах набули розвитку практичні і теоретичні питання щодо завдань вибору ШРС, це неможливо без наукового обґрунтування цих кроків. Для різних галузей науки і техніки ефективно використовуються математичні методи теорії дослідження операцій [3, 4]. Разом з цим в кожному конкретному випадку необхідно враховувати особливості завдань, що розв'язуються, і обмеження. Крім цього необхідно

обґрунтувати систему утримання ШРС для конкретних умов експлуатації.

Так, у низці праць досліджені питання ефективної зони дії комплексних пунктів діагностування і закріплення за ремонтними заводами локомотивних депо.

У фахових зарубіжних і вітчизняних виданнях подано результати досліджень щодо оптимізації системи ремонту ШРС [5–9], які пропонують різні підходи щодо формування системи утримання різних одиниць ШРС на прикладі досліджуваних. Але для системи утримання ШРС ці дослідження не набули необхідного розвитку. Тому актуальністю досліджень є рішення щодо обґрунтування вибору ШРС для України, що вимагає оцінки їх характеристик.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення конкурентоспроможності швидкісного рухомого складу на підставі визначення вагових характеристик, споживчих та вартісних показників властивостей сучасних ШРС.

Завданням дослідження є проведення розрахунку індексів споживчих і вартісних показників ШРС у порівнянні з ШРС інших країн.

Основна частина. В сучасних методиках кваліметричного розрахунку якості техніки використовують зокрема коефіцієнт конкурентоспроможності [1], значення якого обирається на рівні 0,8÷1,2. Нижні і верхні границі досить умовні і залежать від багатьох факторів, які мають якісну характеристику. Щоб уникнути такої невизначеності, виконані такі процедури:

- проведена експертна оцінка вагових характеристик ШРС і обрані найбільш інформаційні характеристики (табл. 1);
- розраховані індекси споживчих і вартісних параметрів ШРС;
- визначено коефіцієнти конкурентоспроможності.

Згідно з даними табл. 2 попередньо виставлені оцінки за шкалою: від 1 – найвища до 6 – найнижча (неважлива) і зведемо їх в табл. 1, згідно з даними якої визначені вагові коефіцієнти параметрів.

Як зразок обираємо двосистемний електропоїзд ЕКр1 «Гарпан» ВАТ «КВБЗ» для міжрегіональних пасажирських перевезень (далі – поїзд), призначений для швидких перевезень пасажирів у вагонах підвищеного комфорту, з максимальною експлуатаційною швидкістю до 160 км/год по залізницях України із шириною колії 1 520 мм на електрифікованих ділянках колії з постійним струмом напругою 3000 В та змінним струмом напругою 25 000 В, частотою 50 Гц.

Основні характеристики електропоїзда ЕКр1 «Гарпан», які висуваються до його технічних та експлуатаційних параметрів, наведені в табл. 2. Зважаючи на технічні вимоги, що висуваються до двосистемного електропоїзда з розподіленою тягою для міжрегіональних пасажирських перевезень по залізницях України, було виявлено потенційних виробників даного типу рухомого складу, на підставі чого

проведене порівняння їх характеристик (табл. 3). Окрім технічних параметрів, відповідності технічним вимогам та економічної доцільності закупівлі і подальшої експлуатації двосистемних міжрегіональних електропоїздів з розподіленою тягою, перевагу слід надати тому варіанту, який враховує також низку передумов, що стосуються терміновості розгортання проекту, забезпечення фінансування проекту, економічної доцільності (табл. 4).

Індекси споживчих і вартісних параметрів дослідного зразка в табл. 3 визначаються за формулою, де у чисельнику – показник дослідної одиниці, а в знаменнику – еталонної

$$I_l^g = \frac{g_i}{g_{eT}} \alpha_g + \frac{V_i}{V_{eT}} \alpha_v + \frac{K_i}{K_{eT}} \alpha_K + \frac{l_i}{l_{eT}} \alpha_l, \quad (1)$$

$$I_B^g = \frac{N_i}{N_{eT}} \alpha_N * i_T + \frac{E_i}{E_{eT}} \alpha_E * i_T, \quad (2)$$

- де g – максимальне навантаження, т/вісь;
- V – максимальна швидкість, км/год;
- K – кількість посадочних місць, кількість;
- l – довжина складу поїзда, м;
- N – потужність силової установки поїзда, кВт;
- E – питома вартість вагона, млн дол.;
- α_i – вага (значущість) показників (за даними експертів);
- i_T – індекс терміну служби.

Індекс терміну служби i_T необхідний для порівняння витрат на ремонт і експлуатацію рухомого складу, визначається за формулою

$$i_T = \frac{T_{cl}^{em}}{T_{cl}^i}. \quad (3)$$

Результати розрахунків подано в табл. 3.

Таблиця 1

Оцінка важливості властивостей транспортного засобу (за даними експертів)

Експерт $i=1,m$	Вага властивостей транспортних засобів, $j=1,n$					
	Споживчі властивості				Вартісні показники	
	Максимальне навантаження на вісь, т/вісь	Максимальна швидкість, км/год	Кількість місць в поїзді, місць	Довжина поїзда, м	Потужність, кВт	Питома вартість, млн грн
1	6	3	4	2	5	1
2	6	3	4	2	5	1
3	5	3	1	4	6	2
4	4	3	6	1	5	2
5	5	4	3	2	6	1
6	6	3	2	1	5	4
7	2	3	4	1	6	5
8	4	3	5	1	6	2
9	3	4	5	2	6	1
10	6	4	3	2	5	1
11	4	3	5	2	6	1
12	5	3	1	2	6	4
13	6	5	3	1	2	4
14	4	2	5	3	6	1
15	3	2	4	5	6	1
16	2	4	5	1	6	3
17	2	3	5	4	6	1
18	4	3	6	2	5	1
19	4	3	5	1	6	2
20	3	4	5	2	6	1
$x_j = \sum_{i=1}^m x_{ij}$	84	65	81	41	110	39
$a_j^2 = (x_j - \bar{x}_j)^2$	196	25	121	841	1600	961

Розрахунки рівня конкурентоспроможності наведені на прикладі вітчизняного електропоїзда ЕКр1 «Тарпан» ВАТ «КВБЗ». В табл. 4 подано розрахунок

рівня конкурентоспроможності з наведеними зразками сучасного швидкісного рухомого складу.

Таблиця 2

Порівняння найбільш близьких моделей рухомого складу світових виробників

Назва моделі	Виробник	Країна-виробник	Термін служби, рр.	Довжина состава, м	Потужність, кВт	Максимальна швидкість, км/год	Максимальне навантаження на вісь, т/вісь	Кількість посадочних місць в поїзді	Питома вартість, млн. дол. США
1	HRCS2	Південна Корея	50	200,16 (9 вагонів)	5 200–6 000	160–176	17	587	3,3
2	EJ 675	Чехія	40	158 400 (6 вагонів)	4 000	160	21,5	636	4,467
3	32 FLIRT	Швейцарія	30	74,3	2 600	140–160	18	219	2,2
4	Spacium	Канада	40	125,7 (9 вагонів)	4 200	140–160	21,5	424 (534) (9 вагонів)	
5	Desiro ML (аналог Pesa Бидгощ)	Німеччина	40	93,3 (4 вагони)	до 2 600	140–160	17	248 (584)	3,7
6	Pendolino	Франція	40	~180 (7 вагонів)		220	17	352	5,8
7	Sapsan/Velaro Rus	Німеччина	30	250 (10 вагонів)	8 000	250	17	604	4,7–6,0
8	ЕКр1 «Тарпан»	Україна	40	26,696 (9 вагонів)	4 000	160	18	643	2,78

Зразок лаявних

Таблиця 3

Індекси споживчих і вартісних показників ПРС

Назва моделі	Виробник	Країна виробник	Індекс терміну служби, α_T	Індекс довжини складу поїзда, α_L	Індекс максимальної швидкості, α_V	Індекс максимального навантаження на вісь, α_E	Індекс кількості посадочних місць	Індекс потужності силової установки, α_M	Індекс питомої вартості, α_F
1 HRCS2	Hyundai Rotem	Південна Корея	1,25	0,88	1,1	0,94	0,91	1,5	0,84
2 EJ 675	«Škoda Vagonka»	Чехія	1	0,696	1	1,19	0,989	1	0,62
3 32 FLIRT	Stadler Rail	Швейцарія	0,75	0,327	1	1	0,34	0,65	1,26
4 Spacium	Bombardier	Канада	1	0,554	1	1,19	0,83	1,05	-
5 Desiro ML (аналог Pesa Бидгощ)	Siemens	Німеччина	1	0,41	1	0,94	0,91	0,65	0,75
6 Pendolino	Alstom	Франція	1	0,79	1,375	-	0,55	-	0,48
7 Sapsan/Velaro Rus	Siemens	Німеччина	0,75	1,1	1,56	0,94	0,94	2	0,6
8 ЕКр1 «Тарпан»	ВАТ «КВБЗ»	Україна	1	0,1	0,4	0,2	0,3	0,4	0,6

Таблиця 4

Техніко-економічні характеристики міжрегіональних поїздів

Параметр	HRCS2 Hyunday Rotem	EJ 675 «Škoda Vagonka»	ЕКр1 «Тарпан» ВАТ «КВБЗ»
Кількість вагонів	9 (6 моторних + 3 причіпних)	6 (2 моторних + 4 причіпних)	9 (2 моторних головних + 7 причіпних)
Загальна потужність, кВт	6 000	4 000	4 000
Максимальне навантаження на вісь, тс	19	21, 5 (17,75 для П)	18
Довжина поїзда, мм	200 160	158 400	227 722
Прискорення при пуску від 0 до 60 км/год, м/с ²	0,7	0,61	0,58
Кількість місць для сидіння	579	636	643
Термін служби, рр.	50	40	40
Сума контракту	307,0 млн дол.	39,9 €	399,999984 млн грн
Вартість одного електропоїзда, млн	30,7 млн дол.	19,95 €	199, 999992 млн грн

Індекс конкурентоспроможності визначається за формулою

$$I_k = \frac{I_l^g}{I_B^g}, \quad (4)$$

де I_l^g – індекс споживчих параметрів;

I_B^g – індекс вартісних параметрів.

Питома вага показників за споживчими і вартісними параметрами визначалась експертним шляхом.

Індекси споживчих і вартісних параметрів дослідного зразка визначають за формулами (1) та (2). Індекс терміну служби необхідний для порівняння витрат на ремонт і експлуатацію вантажних одиниць, визначається за формулою (3).

Кращим обирається той варіант, для якого значення індексу споживчих параметрів буде найбільшим.

Розрахунки індексів подано в табл. 5.

Висновки:

1. З наведених розрахунків видно, що вітчизняний ШРС ЕКр1 «Тарпан» має високий рівень конкурентоспроможності в порівнянні з багатьма ШРС інших країн. Це визначає доцільність подальшого розвитку інфраструктури системи утримання ШРС на базі власного виробництва з поступовим освоєнням організації утримання закордонного ШРС на власній ремонтній базі своїм ремонтним персоналом.

2. Звідси виникає потреба визначення і оцінки виробничої потужності, резервів, а також доцільності переоснащення існуючих депо з метою організації технічного обслуговування ШРС, що експлуатується в Україні.

Розрахунки рівня конкурентоспроможності

№ з\п	Назва моделі	Показники	Розрахунки	
1	HRCS2	Споживчі	$0,1 * 0,88 + 0,4 * 1,1 + 0,2 * 0,94 + 0,3 * 0,91 = 0,989$	
		Вартісні	$(0,4 * 1,5 + 0,6 * 0,84) * 1,25 = 1,38$	
2	EJ 675	Споживчі	$0,1 * 0,696 + 0,4 * 1 + 0,2 * 1,19 + 0,3 * 0,989 = 1$	
		Вартісні	$(0,4 * 1 + 0,6 * 0,62) * 1 = 0,772$	
3	32 FLIRT	Споживчі	$0,1 * 0,327 + 0,4 * 1 + 0,2 * 1 + 0,3 * 0,34 = 0,735$	
		Вартісні	$(0,4 * 0,65 + 0,6 * 1,26) * 0,75 = 0,762$	
4	Spacium	Споживчі	$0,1 * 0,554 + 0,4 * 1 + 0,2 * 1,19 + 0,3 * 0,83 = 0,94$	
		Вартісні	$(0,4 * 1,05 + 0,6 * 0,62) * 1 = 0,792$	
5	Desiro ML (аналог Pesa Бидгощ)	Споживчі	$0,1 * 0,41 + 0,4 * 1 + 0,2 * 0,94 + 0,3 * 0,91 = 0,902$	
		Вартісні	$(0,4 * 0,65 + 0,6 * 0,75) * 1 = 0,71$	
6	Pendolino	Споживчі	$0,1 * 0,79 + 0,4 * 1,375 + 0,2 * 1 + 0,3 * 0,55 = 0,994$	
		Вартісні	$(0,4 * 0,75 + 0,6 * 0,48) * 1 = 0,588$	
7	Sapsan/ Velaro Rus	Споживчі	$0,1 * 1,1 + 0,4 * 1,56 + 0,2 * 0,94 + 0,3 * 0,94 = 1,204$	
		Вартісні	$(0,4 * 2,0 + 0,6 * 0,6) * 0,75 = 0,87$	

Список використаних джерел

1. Азгальдов, Г. Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии) [Текст] / Г. Г. Азгальдов. – М. : Экономика, 1982. – 256 с.
2. Крашенінін, О. С. Вибір та оцінка параметрів системи утримання локомотивів [Текст] / О. С. Крашенінін // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 150. – С. 121-124.
3. Федоренко, І. К. Дослідження операцій в економіці [Текст]: підручник / І. К. Федоренко, О. І. Черняк, О. О. Карагодова. – К. : Знання, 2007. – 558 с.
4. Катренко, А. В. Дослідження операцій [Текст]: підручник / А. В. Катренко. – Львів: Магнолія Плюс, 2004. – 549 с.
5. Концепція розвитку і реструктуризації локомотивних депо [Текст] / А. П. Фалендиш, О. С. Крашенінін, О. О. Шапатіна, М. М. Одегов // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – 2011. – № 27. – С. 133-136.
6. Модель оптимізації системи технічного обслуговування та ремонту локомотивів [Текст] / А. П. Фалендиш, А. Л. Сумцов, Ю. В. Білецький // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – Т. 2. – № 207. – С. 45-49.
7. Иванова, Н. Г. Применение методики расчета стоимости жизненного цикла при оценке эффективности инноваций на железнодорожном транспорте [Текст] / Н. Г. Иванова // Локомотив. – 2007. – № 8. – С. 12-15.

8. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог [Текст] : монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин, А. П. Фалендыш. – Луганск: Изд-во “Наулирис”, 2011. – 174 с.

9. System approach to the organization of locomotive maintenance on Ukraine railways. (Book Chapter) Studies in Systems, Decision and Control [Text] / E. Tartakovsky, O. Ustenko, V. Puzyr, Y. Datsun // Ukrainian state university of railway transport. – Kharkiv, 2017. – N. 87. – P. 217-236.

Крашенінін Олександр Семенович, д-р техн. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 057-730-19-99. E-mail: pomndu@ukr.net.

Яковлев Сергій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 057-730-19-99. E-mail: pomndu@ukr.net.

Krashenin Olexander, Ph.D., professor of maintenance and repair of rolling stock Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 057-730-19-99. E-mail: pomndu@ukr.net.

Yakovlev Sergiy, graduate student of maintenance and repair of rolling stock Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 057-730-19-99. E-mail: pomndu@ukr.net.

Стаття прийнята 21.12.2017 р.

УДК 004.62

ПРОБЛЕМИ ОБЛІКУ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ У ЛОКОМОТИВНОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Д-р техн. наук В. І. Мойсеєнко, асп. М. О. Котов

ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ЛОКОМОТИВНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Д-р техн. наук В. И. Моисеенко, асп. Н. О. Котов

PROBLEMS OF ACCOUNTING FUEL AND ENERGY RESOURCES IN THE LOCOMOTIVES DEPARTMENT

Dr. sc. sciences V. I. Moiseenko, pg. M. O. Kotov

Одним із головних питань, що пов'язані з економним використанням енергоресурсів, є їх облік та контроль. Основні методи обліку палива у локомотивних господарствах Укрзалізниці засновані на застарілих способах вимірювань, ручних замірах, періодичному контролі щільності та температури за допомогою проби. Подані ключові точки втрат та їх вага в усьому процесі обліку. Сформульовані проблеми контролю та обліку паливно-мастильних матеріалів дали подальший розвиток для формування принципів створення комплексної автоматизованої системи на базі удосконалення взаємодії існуючих систем.

Ключові слова: автоматизація, контроль, облік, аудит, паливо.

Одним из главных вопросов, связанных с экономным использованием энергоресурсов, является их учет и контроль. Основные методы учета топлива в локомотивных хозяйствах Укрзалізниці основаны на устаревших способах измерений, ручных замерах, периодическом контроле плотности и температуры с помощью пробы. Приведены ключевые точки потерь

и их вес во всем процессе учета. Сформулированные проблемы контроля и учета горюче-смазочных материалов дали дальнейшее развитие для формирования принципов создания комплексной системы на базе совершенствования взаимодействия существующих систем.

Ключевые слова: автоматизация, контроль, учет, аудит, топливо.

One of the main questions connected with the economical use of energy sources is their accounting and management. Railway transport is one of the main consumers of fuel and lubricants in Ukraine, the main is the locomotive facilities. The analyzed technological process of using railway fuel has shown both the losses and the vulnerabilities for accounting points. The article deals with the stages of acceptance, storage and release of fuel and further possible interaction with the exploitation. The principal fuel consumption control methods in locomotive facilities of Ukrzaliznytsia are based on outdated measurement methods, manual measurements, periodic density and temperature control through the test. Key power losses and their weight are stated during the process data. Paper is devoted to the ways of accounting and management solving problems of fuel and lubricant material data in locomotive facilities. Also is considering the issues the integration of existing systems and further complex automation of the technological process.

Keywords: automation, control, accounting, audit, fuel.

Вступ. Залізничний транспорт є одним з основних споживачів паливно-мастильних матеріалів в Україні, головним є локомотивне господарство. Вказана тенденція скоріше за все буде спостерігатися в найближчі 5-10 років. Щорічна витрата палива залізничним транспортом становить близько 300 тис. тонн дизельного палива [1]. Зважаючи на наведені показники об'ємів та наявні втрати спожитих паливно-мастильних матеріалів і тенденції зростання цін на паливо, роботи, пов'язані з їх ефективним використанням, обліком та енергозбереженням, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний рівень розвитку і організації системи контролю за використанням паливно-мастильних матеріалів достатньо повно відображений у регламентуючих документах Укрзалізниці. Відомчими нормативними документами встановлені норми, що регулюють облік палива [2]. Наукові проблеми з автоматизації обліку паливно-енергетичних ресурсів та створення відповідних технічних засобів розглядаються у роботах фахівців [3-5, 10, 11].

Тепер у локомотивному господарстві Укрзалізниці все більш актуальним є

використання автоматизації як індивідуальних робочих місць, так і складних виробничих процесів, що визначають основні показники галузі. Це автоматизовані системи "АСУ ЛокБриг", "АСК ВП УЗ", "ЮММ" та численні розробки автоматизованих робочих місць "АРМ ТЧД", "ТЧБ", "ТЧМ1" тощо. Існують спроби автоматизації обліку і контролю за витратами енергоресурсів на базах палива: "Гамма", "Резервуар-2", "СФИНКС-ТНТС". Також застосовуються технічні засоби автоматизованого контролю наявності палива в паливних баках тепловозів: "АС БІС-Р", "БОРТ", "РПРТ", "ІГЛА" та ін. Вказані системи інформаційно не інтегровані, тим більше, у технологічному процесі обліку є досить багато операцій, які виконуються людиною. Інженерна проблема полягає в інтеграції наявних систем та подальшій комплексній автоматизації технологічного процесу. Питання щодо зменшення людського чинника та створення комплексної автоматизованої системи обліку паливно-енергетичних ресурсів локомотивним господарством розглянуто у [6]. Науковою проблемою є завдання розробки науково-методичного забезпечення функціонування та принципів побудови комплексної

автоматизованої системи контролю та обліку витрат дизельного палива локомотивними господарствами Укрзалізниці.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є аналіз проблем обліку паливно-енергетичних ресурсів у локомотивному господарстві. Можливі шляхи удосконалення процесу контролю використання палива локомотивними господарствами та його подальший розвиток є завданням наукової роботи.

Основна частина дослідження. Розглянемо технологічний процес, пов'язаний з придбанням і використанням дизельного пального на підприємствах локомотивного господарства. В цьому процесі можна виділити чотири основних етапи: приймання, зберігання, відпуск та експлуатація палива. У статті розглядаються етапи приймання, зберігання та відпуску палива, рис. 1.

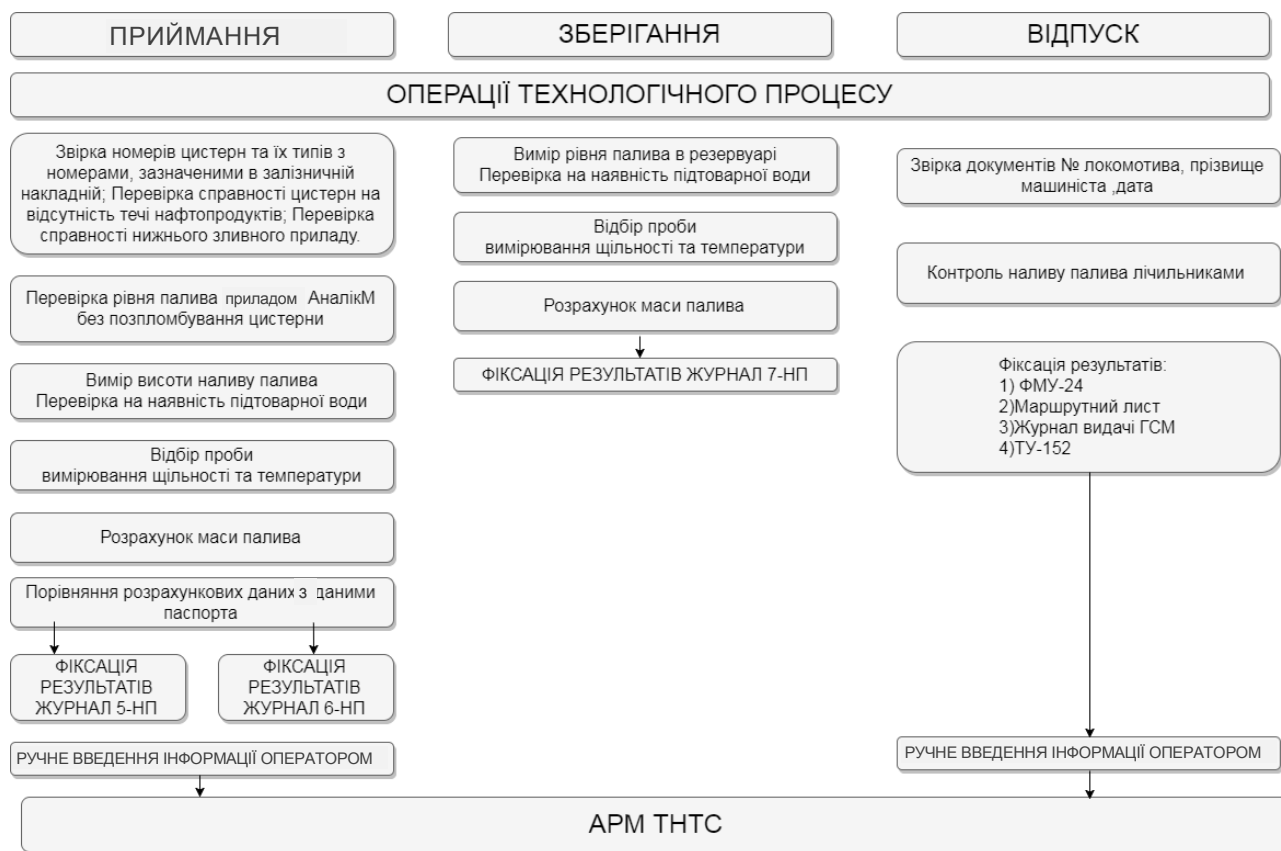


Рис. 1. Технологічний процес використання дизельного пального

На етапі приймання відбувається первинна перевірка цистерни, замір рівня палива та обчислювання його маси з фіксацією результатів у відповідні журнали та наступним введенням інформації до АРМ ТНТС актом приймання ПММ. На етапі зберігання відбувається періодичне вимірювання кількості палива, розрахунок

маси та фіксація даних у журналі форми 7-НП. Етап відпуску характеризується процедурами оформлення документів та контролем процесу наливу з фіксацією результатів у відповідних формах.

Основними недоліками цих етапів є ручні заміри за допомогою метрштока та рулетки. Також варто відзначити процес

виміру щільності та температури палива. У цистернах та резервуарах ці змінні коливаються в різних місцях тари, крім того, на результат виміру впливають зовнішні чинники. При видачі палива за допомогою паливороздатних колонок контроль наливу здійснюється за допомогою лічильників, показання яких документуються, але автоматичної фіксації показань та автоматизації обліку у локомотивних господарствах здебільшого не здійснюється. На деяких станціях (наприклад станція Смородино Південної залізниці) використовуються автоматизовані елементи екіпірувального пункту, зокрема система автоматизації заправної станції T&T NAFTA POST. Відображення заповнення резервуарів і параметрів рідини забезпечується встановленим програмним забезпеченням ASU_Project [7]. Однак

вказані системи мають локальний характер управління і функціонують автономно.

Недосконалість технології обліку і контролю, заснованої на застарілих методах вимірювань [2], та фіксації результатів є головною причиною невиробничих втрат дизельного палива. Крім того, наявність людини-оператора, яка інтегрована у всі етапи технологічного циклу, дозволяє маскувати порушення встановленого порядку обліку.

Варто зауважити, що на кожному етапі усього життєвого циклу використання палива наявні втрати, починаючи з поставки палива з заводу-постачальника та закінчуючи його кінцевим споживанням. Тому доцільно більш детально розглянути основні випадки втрат на етапах життєвого циклу, рис. 2.

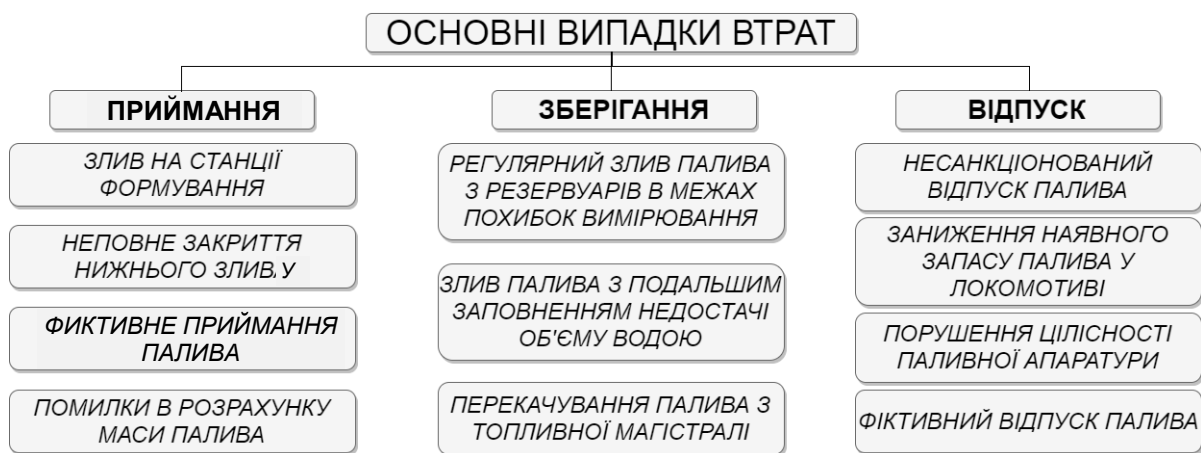


Рис. 2. Основні випадки втрат при використанні палива

Нормативним документом [2] встановлені критичні вимоги щодо втрат при вимірі дизельного пального. При зливі та зберіганні цей показник дорівнює 0,65 %, а при екіпіруванні 0,25 %.

В процесі експлуатації та ремонту рухомого складу має місце значна частка втрат унаслідок штучних реостатних випробувань, завищення витрат палива машиністом за зміну тощо.

На зарубіжних залізницях також вирішуються питання комплексного управління використання енергоресурсів. Для вирішення вказаних проблем застосовуються автоматизовані системи обліку паливно-енергетичних ресурсів. Так, у роботі [8] розглядається автоматизована система обліку, яка базується на комплексному підході до процесу обліку паливно-енергетичних ресурсів, рис. 3.

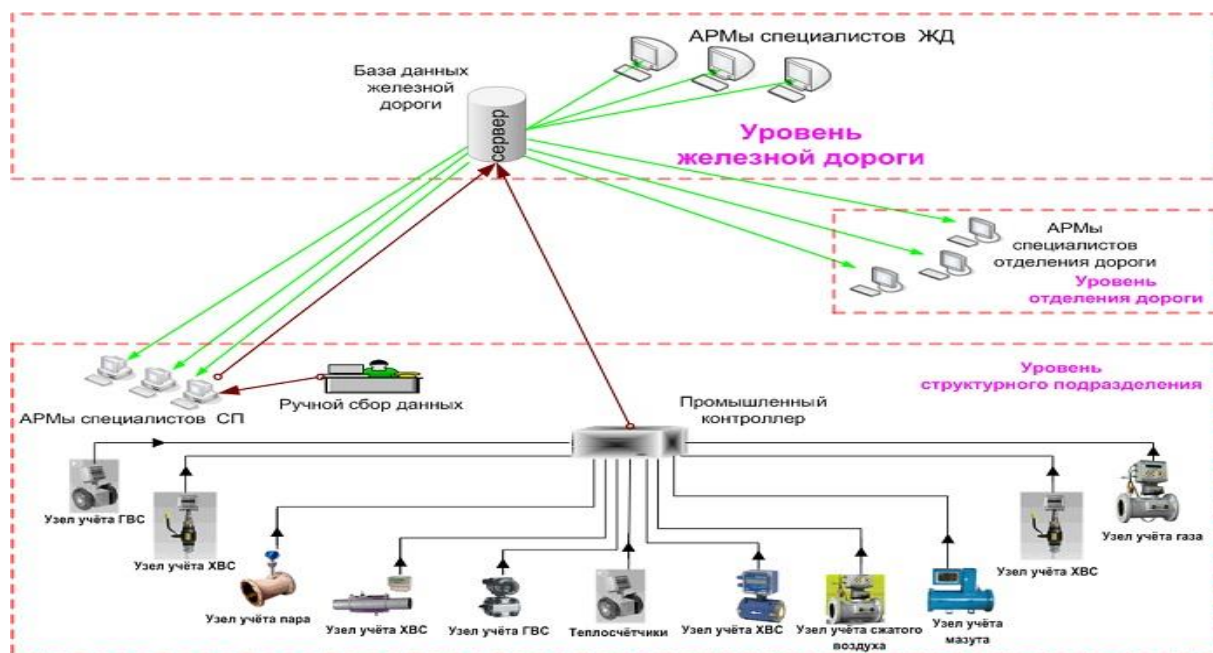


Рис. 3. Автоматизована система обліку паливно-енергетичних ресурсів залізниці

На нижньому рівні системи встановлені датчики, що зв'язані з промисловим контролером, завданням якого є зв'язок з сервером залізниці. Додатково на цьому рівні функціонують АРМи спеціалістів з обліку паливно-мастильних матеріалів. На рівні залізниці функціонує загальна база даних, яка забезпечує обробку інформації з усіх відділів залізниці.

У суміжних галузях (авіаційний, морський та автомобільний транспорт, агропромисловий комплекс) вказані проблеми також є досить актуальними. Наприклад, дворівнева система комплексної автоматизації нафтобази [9], що поділяється на виконавчий та управлінський функціонал. Вона реалізує завдання зберігання, приймання та зливання нафтопродукту, вимірювання його рівня та контроль при русі нафтопродукту, рис. 4.

Питання ефективного використання енергоресурсів на залізниці при існуючих автоматизованих системах залишаються актуальними через відсутність зворотного зв'язку витрати палива на тепловозах при експлуатації та комплексному підході до обліку та енергоменеджменту.

Аналіз технологічного процесу використання дизельного пального, джерел його втрат на усіх етапах його життєвого циклу та стан науково-практичних розробок у цій галузі вказує на необхідність проведення системного аналізу операцій технологічного процесу використання ПММ на залізничному транспорті та детального дослідження ролі людини-оператора у цьому процесі.

Висновки. Проведене дослідження технологічного процесу придбання і використання дизельного пального на підприємствах залізничного транспорту дозволило визначити основні «вузькі місця», що є причинами появи втрат палива. Визначено, що однією з основних причин втрат є використання застарілих методів вимірювання, фіксація результатів та наявність людини-оператора, яка безпосередньо інтегрована у цей процес. Вирішення цих проблем можливо при впровадженні комплексної автоматизованої системи обліку та контролю дизельного пального, яка охоплює всі рівні керування цим процесом.

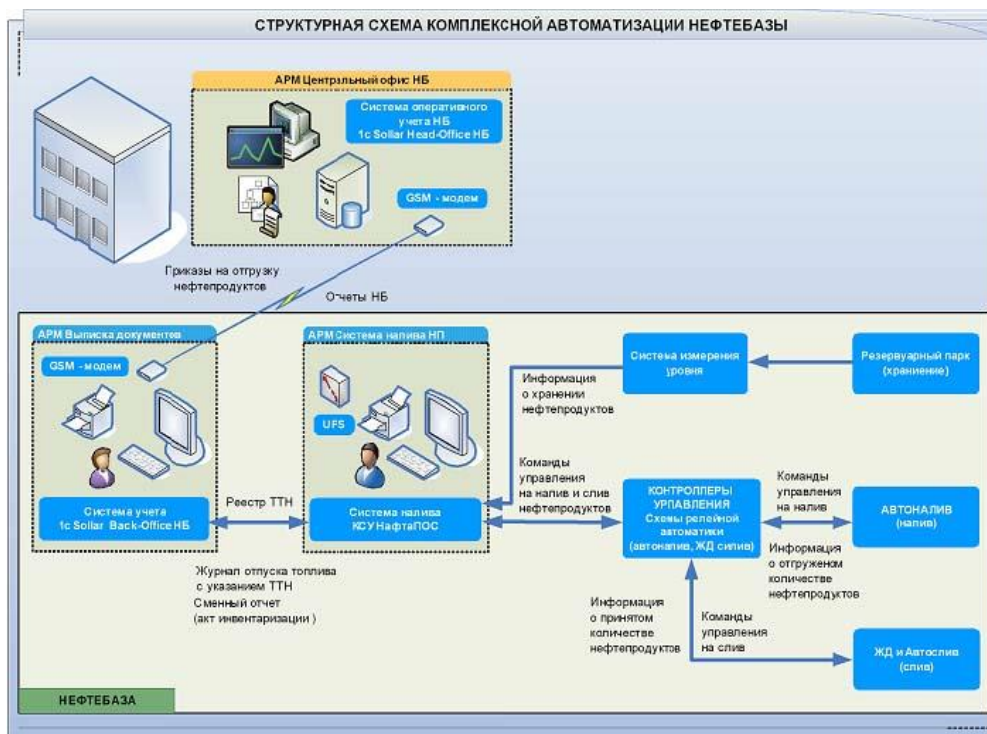


Рис. 4. Структурна схема комплексної автоматизації нафтобази

Список використаних джерел

1. Аналіз використання паливно-енергетичних ресурсів на залізничному транспорті України за 2016 рік [Текст]. – К. : ПАТ «Укрзалізниця», 2017. – 144 с.
2. Інструкція про порядок приймання, транспортування, зберігання, відпуску та обліку нафти і нафтопродуктів на підприємствах і організаціях України [Електронний ресурс] / Міністерство палива та енергетики України. – 2008. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0805-08>.
3. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством. АСУТ [Текст] / под ред. И. К. Лакина. – М.: ОЦВ, 2002. – 516 с.
4. Тимченко, А. Ю. Повышение эффективности деятельности топливно-складского комплекса железнодорожного транспорта [Текст] / А. Ю. Тимченко, Б. Ф. Безродный // Известия института инженерной физики. – 2012. – №23. – С. 20–23.
5. Автоматизация учета ТЗК на платформе «1С:Предприятие» [Электронный ресурс] // Центр учетных технологий, Москва, www.center-ut.ru. – 2014. – Режим доступа: <http://www.center-ut.ru/files/methods/avtomatizatsiya%20tzk.pdf>.
6. Шепель, В. В. Особлива думка з розробки та впровадження автоматизованої системи управління локомотивним господарством (АСУ Т) на платформі АСК ВП УЗ-Є з відміною застарілих систем – ЮММ, АСУ ЛокБриг [Електронний ресурс] / В. В. Шепель. – Режим доступу: <http://railway-publish.com/zheleznaya-doroga-budu-4.html>.
7. Древаль, И. М. Реконструкция пункта экипировки локомотивного депо Смородино [Текст] / И. М. Древаль // ЛОКОМОТИВ-ИНФОРМ. – 2012. – №5. – С. 45.
8. Автоматизированная система комплексного учета топливно-энергетических ресурсов железной дороги (АСКУ ТЭР ЖД) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rzd-expo.ru/innovation/resource_saving/section2/.

9. Структурная схема комплексной автоматизации нефтебазы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.technotrade.ua/wneftebaza.htm>.

10. Kyung-II Min. An Economic Dispatch Algorithm as Combinatorial Optimization Problems [Text] / Kyung-II Min, Su-Won Lee, Young-Hyun Moon // International Journal of Control, Automation, and Systems. – 2008. – №6. – P. 468–476.

11. Козлова, Е. В. Интегрированная система поддержки принятия решений по управлению структурами производственных процессов [Текст] / Е. В. Козлова // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2011. – №12. – С. 45–50.

Мойсеєнко Валентин Іванович, д-р техн. наук, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-62. E-mail: mvi53@ukr.net.
Котов Микита Олегович, аспірант кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-35. E-mail: kotov@kart.edu.ua.

Moiseenko Valentin, Dr. Sc. Science, professor of department specialized computer systems Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-62. E-mail: mvi53@ukr.net.

Kotov Mykyta, graduate student of department specialized computer systems Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-35. E-mail: kotov@kart.edu.ua.

Стаття прийнята 26.12.2017 р.

УДК 625.033.373

АНАЛІЗ СТАНУ РЕЙОК У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Д-р техн. наук С. С. Тимофєєв, асп. Н. Р. Огульчанська

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Д-р техн. наук С. С. Тимофеев, асп. Н. Р. Огульчанская

ANALYSIS OF THE CONDITION OF RAILS DURING OPERATION

Dr. tech. sc. S. Timofeyev, postgraduate N. Ohulchanska

Розглянуто причини виходу з ладу рейок, дефекти, що виникають унаслідок цього, та їх місцезнаходження. Досліджено розподіл знеуглецьованого шару по периметру і довжині рейки, а також зв'язок між уже утвореними напливами і знеуглецьованим шаром. Як зразок використано 2-метровий шматок рейки, що не був в експлуатації. Вивчено характер перебігу пластичних деформацій рейкового металу з наявністю знеуглецьованого шару і без нього.

Ключові слова: знеуглецювання, шар, дефекти, рейки, поверхня, вкраплення, тріщина, деформація.

Рассмотрены причины выхода из строя рельсов, дефекты, возникающие в результате этого, и их расположение. Исследовано распределение обезуглероженного слоя по периметру и длине рельса, а также связь между образовавшимися напливами и обезуглероженным слоем. В качестве образца использовался 2-метровый кусок рельса,

который не был в эксплуатации. Изучен характер протекания пластических деформаций рельсового металла с наличием обезуглероженного слоя и без него.

Ключевые слова: обезуглероживание, слой, дефекты, рельсы, поверхность, включения, трещина, деформация.

The causes of the failure of rails, the defects that are emerge consequently and their location are considered in the article. The distribution of the decarburized layer along the perimeter and length of the rail is investigated. The character of the flow of plastic deformations of a rail metal with the presence of a decarburized layer and without it has been studied. During the crystallization of ingots, carbon atoms migrate to the surface of the casting and decarburization of the surface. The presence of the decarburized layer on the contact surface of the rail plays a role in the initial stage of the plastic deformation process that occurs when there is a contact stress. The dependence of the distribution of the decarburized layer along the length of the rail head and the relationship between the already created inflows and the decarburized layer is established. A graph of the distribution of the decarburized layer along the length of a 2 meter rail piece is constructed. Simultaneously, the character of the distribution of nonmetallic inclusions along the section of the rail head was also investigated. There is a strong contamination of metal rails with nonmetallic inclusions of oxide and sulphide character. The presence of clusters of nonmetallic inclusions contributes to the development of a fracture in the fractional section. The development of this crack to the surface of rolling is excluded due to the presence of compressive stresses in the surface-hardened metal layer of the rail.

Keywords: decarburization, layer, defects, rails, surface, inclusions, crack, deformation.

Вступ. У зв'язку зі швидким розвитком народного господарства з року в рік зростає вантажна напруженість залізниць, підвищуються швидкості руху поїздів, збільшуються осьові навантаження. Зі зростанням вантажна напруженості підвищуються вимоги до рейкового металу. Рейки зазнають швидкого зносу і виходять з ладу. Для забезпечення зносостійкості і безпеки руху поїздів застосовуються рейки типу Р50, UIC 60, Р65, хімічний склад і механічні властивості яких наведені в табл. 1, 2. Твердість забезпечується структурою, що одержана при їх виготовленні, а саме: термічна обробка, загартування і відпуск. Структура згідно з ДСТУ 4344 належить до відпущеного мартенситу. Рейки такої структури мають незначний знос, але в результаті термо-механо-хімічних реакцій у зоні контакту рейка-колесо виникають дефекти (темні плями, поздовжні розшарування, вищербини, виривання), що призводять до руйнування рейок. Для усунення хвилеподібного зносу рейок і дефектів, що його обумовлюють, необхідно

мати уявлення про причини утворення дефектів у зоні контакту рейка-колесо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині проблема усунення рейкових дефектів, зокрема хвилеподібного зносу, та підвищення якості рейкової сталі залишається актуальною. Тому що від стану рейок залежить безпека пасажирів та вантажоперевезень. Над вирішенням таких питань працювали вчені багатьох країн. Серед них немало й наших співвітчизників, а саме: Даниленко Е. І., Даренський О. М., Тимофєєва Л. А., Скобло Т. С., Сапожков В. Є., Сидашенко А. І., Кулагіна М. І., Зоткіна Г. В. та багато інших.

У теперішній час у працях українських та закордонних учених про усунення хвилеподібного зносу основна увага приділялася розробленню й удосконаленню конструкції машин і механізмів рейкошліфувальних машин. Але не досліджувалося питання взаємодії рейка-колесо і впливу термо-механо-хімічних взаємодій на структуру і властивості як вихідного металу, так і того, що вже

експлуатується. Крім того, у працях Даниленка Е. І. [1] досліджувався стан суцільнолитих хрестовин під впливом

підвищених колісних навантажень, але не розглядалося питання структури фазового складу рейкового металу.

Таблиця 1

Хімічний склад рейкової сталі

Марка сталі	Масова частка хімічних елементів, %							
	Вуглець	Марганець	Кремній	Ванадій	Титан	Фосфор	Сірка	Алюміній
M74Ф	0,69-0,80	0,80-1,30	0,18-0,40	0,03-0,07	-	0,035	0,040	0,015
K74Ф	0,69-0,80	0,80-1,30	0,18-0,40	0,03-0,07	-	0,035	0,040	0,015
E74Ф	0,69-0,80	0,80-1,30	0,18-0,40	0,03-0,07	-	0,030	0,025	0,015
M74Т	0,69-0,80	0,80-1,30	0,18-0,40	-	0,007-0,0025	0,035	0,040	0,015
K74Т	0,69-0,80	0,80-1,30	0,18-0,40	-	0,007-0,0025	0,035	0,040	0,015
E74Т	0,69-0,80	0,80-1,30	0,18-0,40	-	0,007-0,0025	0,030	0,025	0,015
M74	0,69-0,80	0,80-1,30	0,18-0,40	-	-	0,035	0,040	0,025
K74	0,69-0,80	0,80-1,30	0,18-0,40	-	-	0,035	0,040	0,025
E74	0,69-0,80	0,80-1,30	0,18-0,40	-	-	0,030	0,025	0,025
M76Ф	0,71-0,82	0,80-1,30	0,25-0,45	0,03-0,07	-	0,035	0,040	0,015
K76Ф	0,71-0,82	0,80-1,30	0,25-0,45	0,03-0,07	-	0,035	0,040	0,015
E76Ф	0,71-0,82	0,80-1,30	0,25-0,45	0,03-0,07	-	0,030	0,025	0,015
M76Т	0,71-0,82	0,80-1,30	0,25-0,45	-	0,007-0,0025	0,035	0,040	0,015
K76Т	0,71-0,82	0,80-1,30	0,25-0,45	-	0,007-0,0025	0,035	0,040	0,015
E76Т	0,71-0,82	0,80-1,30	0,25-0,45	-	0,007-0,0025	0,030	0,025	0,015
M76	0,71-0,82	0,80-1,30	0,25-0,45	-	-	0,035	0,040	0,025
K76	0,71-0,82	0,80-1,30	0,25-0,45	-	-	0,035	0,040	0,025
E76	0,71-0,82	0,80-1,30	0,25-0,45	-	-	0,030	0,025	0,025

Таблиця 2

Механічні властивості рейкової сталі

Нормативний документ	Категорія рейки	Тимчасовий опір σ_b , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Межа текучості $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ² (кгс·м/см ²)
		Не менше				
ДСТУ 4344	Вища	1290 (131)	850 (87)	10,0	30,0	15 (1,5)
	I	1196 (122)	800 (82)	8,0	25,0	25 (2,5)
	II	1137 (116)	740 (76)	6,0	25,0	15 (1,5)
	III	900 (92)	-	5,0	-	-

У працях Даренського О. М. [2] визначено взаємозв'язок колії і колійного складу в особливих умовах залізничних колій незагального користування, але не були порушені питання визначення виникнення зносу рейок за рахунок деформаційних складових, що впливають

на виникнення дефектів. Тому питання цієї статті є актуальними.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження було вивчення структурно-фазового стану рейок, як нових так і тих, що вже експлуатуються, аби запобігти утворенню хвилеподібного зносу рейок. Для досягнення поставленої

мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1) визначити структурно-фазовий склад нових рейок і тих, що вже експлуатуються;

2) визначити основні причини зносу рейок у процесі експлуатації;

3) обґрунтувати утворення хвилеподібного зносу рейок.

Основна частина дослідження.

Донедавна підвищення контактної міцності здійснювалося за рахунок поліпшення якості макроструктури рейки. Рейки типу Р50, УІС 60 і Р65 містять близько 0,69-0,82 % вуглецю. Подальше підвищення контактної міцності металу рейок за рахунок збільшення вуглецю небажане, оскільки з його підвищенням збільшується чутливість сталі до різних механічних і термічних дій, підвищується схильність рейок до утворення тріщин. Подальше підвищення міцності рейок може бути здійснене завдяки застосуванню легування і термічної обробки поверхні уздовж головки. Як показали результати досліджень нових рейок, поодинокий вихід з ладу відбувається за такими дефектами: розшарування головки по усадкових раковинах, наявність сегрегації неметалевих вкраплень, волосовини на підшві та ін. А на рейках, що були в експлуатації, у зв'язку зі збільшенням контактної напруги на поверхні кочення головки рейки з'являлися поперечні втомні тріщини, зім'яття головки з напливами металу.

Ці дефекти здебільшого трапляються в рейках, укладених у кривих ділянках колії, тобто у тих рейках, які сприймають поперечні і поздовжні контактні навантаження від рухомого складу. Унаслідок термо-механо-хімічного впливу в зоні контакту рейка-колесо відбувається пластичний плин поверхневого шару металу головки рейки, який спричиняє на бічній внутрішній викружці виникнення напливів деформованого металу і поздовжніх тріщин під ними [3, 4, 9]. Було

порушене питання, чому і з якої причини з'являються згадані дефекти. Тобто згідно зі статистичними даними в опублікованих наукових дослідженнях з питань виготовлення рейок відомо, що в процесі кристалізації злитків у виливницях унаслідок високої температури здійснюється міграція атомів вуглецю на поверхню відливання і знеуглецювання поверхні. Чим товщий переріз відливання і товщина стінок виливниць, тим довше зберігається висока температура, унаслідок чого на велику глибину відбувається знеуглецювання поверхні злитка. Знеуглецьовані злитки після твердіння, перед плющенням, спрямовуються до нагрівальних колодязів, де за звичайних умов нагріву може відбуватися додаткове знеуглецювання й окислення [5–8].

Відповідно до згаданого, рейкова сталь, як близька до евтектоїдного складу, буде мати той чи інший ступінь знеуглецювання поверхні. Наявність знеуглецьованого шару на контактній поверхні рейки повинна відіграти певну роль у початковій стадії процесу пластичної деформації, що виникає за наявності контактної напруги.

Металографічні дослідження цих рейок показали в місцях дефекту наявність знеуглецьованого шару, який на поверхні кочення сильно деформований і зношений, а на бічних гранях досягає глибини до 0,5 мм.

Цікаво встановити залежність розподілу знеуглецьованого шару за довжиною головки рейки і можливий зв'язок між уже утвореними напливами і знеуглецьованим шаром. Для цього був узятий 2-метровий шматок рейки, на якому з боку внутрішньої викружки були ділянки з напливом металу, вищербинами і ділянки, не уражені цими дефектами. Результати дослідження показують, що по всьому периметру головки рейки спостерігається знеуглецьований шар, глибина якого неоднакова. З рис. 1 видно, що глибина цього шару по довжині рейки

розподіляється нерівномірно. Якщо тепер порівняти наявність напливів на бічній викружці головки рейки з глибиною знеуглецьованого шару, можна помітити, що в тих випадках, коли глибина шару максимальна, на дослідженій рейці є

напливи деформованого металу і поздовжні тріщини під ними. В окремих місцях напливи металу відкололися і на поверхні бічної викружки рейки утворилися вищербини.

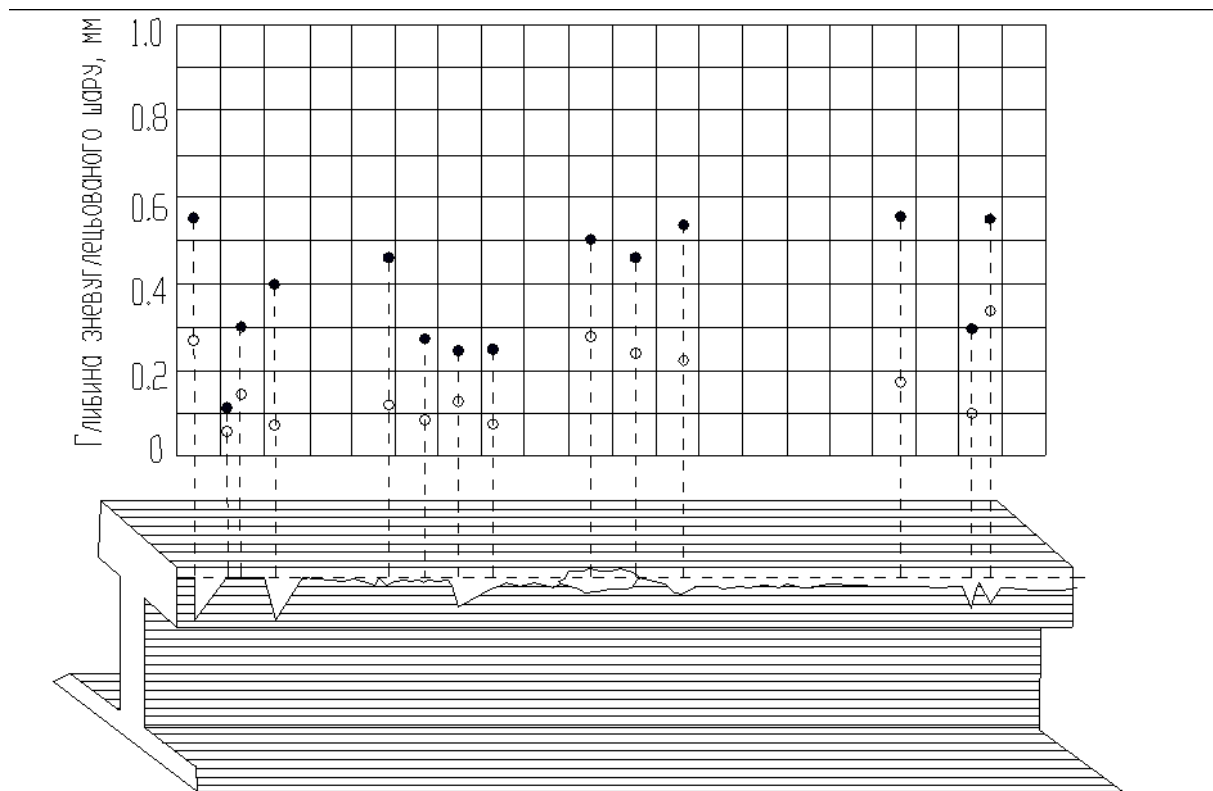


Рис. 1. Графік розподілу знеуглецьованого шару по довжині 2-метрового шматка рейки:

- – глибина знеуглецьованого шару до експлуатації;
- – глибина знеуглецьованого шару в процесі експлуатації

Оскільки визначення глибини знеуглецьованого шару на поверхні кочення рейок, що були в експлуатації, унаслідок зносу і зім'яття є складним завданням, авторами був досліджений 2-метровий шматок рейки, що не був в експлуатації. У цій рейці характер розподілу знеуглецьованого шару такий же, як і в попередньому шматку. Відзначається, що ступінь знеуглецювання більший на поверхні кочення і бічних викружках рейки, де шар досягає глибини від 0,2 до 0,72 мм (рис. 2).

Одночасно досліджувався і характер розподілу неметалевих вкраплень по перерізу головки рейки. Відзначається сильна забрудненість металу рейок неметалевими вкрапленнями оксидного і сульфідного характеру. Розподіл цих вкраплень по перерізу головки нерівномірний, а саме: на поверхні кочення і бічних гранях кількість неметалевих вкраплень на глибину 2–5 мм незначна, тоді як інша частина головки сильно забруднена неметалевими вкрапленнями (рис. 3).



Рис. 2. Знеуглецьований шар на поверхні кочення рейки

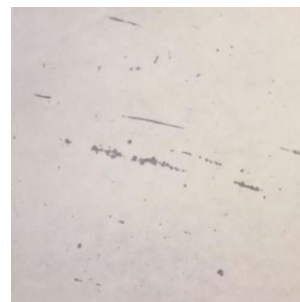


Рис. 3. Неметалеві вкраплення всередині головки рейки, поздовжній переріз

Напливи металу, що спостерігаються на бічну грань, є результатом посиленої пластичної деформації металу над поздовжньою тріщиною, що зароджується на глибині 3–5 мм від поверхні кочення. Це підтверджується більш високою твердістю наклепаного металу напливу вище за тріщину (рис. 4).

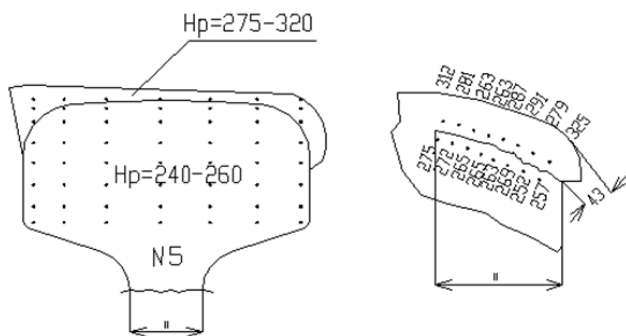


Рис. 4. Розподіл твердості по перерізу головки рейки

Розвиток тріщини в поздовжньому напрямі під напливом деформованого металу носить характер втоми і призводить до виникнення відколів (вищербин) на бічній викружці.

Наявні відколи великої довжини пояснюються зустріччю декількох самостійно розвинутих, поздовжніх тріщин (рис. 5).



Рис. 5. Поверхня поздовжньої тріщини під напливом

Наявність скупчень неметалевих вкраплень сприяє розвитку тріщини в поздовжньому перерізі. Часто розвиток поздовжньої тріщини, як видно з рис. 6, набуває розгалуженого характеру і в тому випадку, якщо на її шляху зустрічаються слабкі місця металургійного характеру, вона може змінити свій напрям і розвинути в поперечну втомну тріщину. Розвиток цієї тріщини до поверхні кочення виключається через наявність напруги стиснення в поверхневому наклепаному шарі металу рейки.



Рис. 6. Розвиток розгалуженої поздовжньої тріщини по неметалевих вкрапленнях

Висновки:

1. Знеуглецьований шар спостерігається на всіх досліджених рейках як по периметру поперечного перерізу, так і по його довжині. Знеуглецьований шар на поверхні кочення рейки в стані постачання досягає глибини до 0,72 мм, що викликає розвиток напливів деформованого металу.

2. Забрудненість металу і надмірні скупчення неметалевих вкраплень сприя-

ють розвитку під напливом тріщини в поздовжньому напрямі, що і призводить до утворення вищербин.

3. Для гальмування в часі зародження мікротріщини і зменшення швидкості її розвитку слід підвищувати межу текучості металу рейок за рахунок легування і термічної обробки.

Список використаних джерел

1. Даниленко, Э. И. Расчет характеристик жесткости и упругости рельсовой нити при кручении под воздействием вертикальных и горизонтальных сил [Текст] / Э. И. Даниленко // Наука та прогрес транспорту: Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2016. – № 5. – С. 79-88.

2. Даренський, О. М. Теоретичні основи визначення параметрів непружних опорів колії [Текст] / О. М. Даренський // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2010. – Вип. 118. – С. 187-194.

3. Митрофанов, Б. П. Природа упругого предварительного смещения: теория трения и износ [Текст] / Б. П. Митрофанов. – М., 2008. – С. 8-11.

4. Буше, Н. А. К вопросам о процессах происходящих на поверхности трения металлических материалов [Текст] / Н. А. Буше // О природе трения твердых тел. – Минск: Наука и техника, 2006. – С. 75-77.

5. Костин, В. Н. О некоторых закономерностях необратимого изменения намагниченности поликристаллических ферромагнетиков [Текст] / В. Н. Костин // Дефектоскопия. – 2004. – №1. – С. 29-38.

6. Chen, C. Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials [Text] / Chin-wen Chen // Courier Dover Publications. – 2010. – 571 p.

7. Visintin, A. Models of Hysteresis [Text] / A. Visintin. – Danvers: CRC Press; 2010. – 221 p.

8. Bulatov, V. V. Computer simulation of dislocations [Text] / V. V. Bulatov, Wei Cai. – Oxford: Oxford University Press, 2006. – 284 p.

9. Gdouts, E. Fracture of nano and engineering materials and structures [Text] / E. Gdouts. – Berkeley: Springer, 2006. – 141 p.

Тимофеев Сергей Сергійович, д-р техн. наук, професор кафедри теплотехніки та теплових двигунів Українського державного університету залізничного транспорту.

Огульчанська Надія Романівна, аспірант кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 068-810-61-26. E-mail: ohulchanska@ukr.net.

Timofeyev Sergiy S., Dr.Tech.Sc., professor dep. "Heat engineering and heat engines", Ukrainian State University of Railway Transport.

Ohulchanska Nadia, postgraduate dep. "Quality, standardization, certification and production technology of materials", Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 068-810-61-26. E-mail: ohulchanska@ukr.net.

Стаття прийнята 22.12.2017 р.

УДК 625.143.482

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАНОВОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Доктори техн. наук С. В. Панченко, О. М. Даренський,
канд. техн. наук О. В. Лобяк

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Доктора техн. наук С. В. Панченко, А. Н. Даренский,
канд. техн. наук А. В. Лобяк

USING THE METHOD OF FINITE ELEMENTS FOR DETERMINING THE STRESSED-DEFORMED STATE OF ELEMENTS OF THE RAILWAY TRACK

Dr. sc. sciences S. V. Panchenko, A. N. Darenskiy, phd. tehn. A. V. Lobyak

Визначено основні принципи побудови і роботи програмного комплексу для оцінки напружено-деформованого стану конструктивних елементів верхньої будови колії під дією просторових сил від рухомого складу. В основу запропонованого програмного комплексу закладено поетапне визначення просторових сил взаємодії динамічної системи «екіпаж-колія» із подальшою оцінкою за методом скінченних елементів. Розроблено розрахункові моделі рейок, елементів проміжних рейкових скріплень, шпал і баласту. При моделюванні елементів колії враховувалися конструктивна і фізична нелінійність їх роботи, наявність сил тертя і односторонніх зв'язків між окремими вузлами і деталями.

Ключові слова: моделювання, рейка, шпала, скріплення, баласт, екіпаж.

Определены основные принципы построения и работы программного комплекса для оценки напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов верхнего строения пути под действием пространственных сил от подвижного состава. В основу предложенного программного комплекса заложено поэтапное определение пространственных сил взаимодействия динамической системы «экипаж-путь» с последующей оценкой по методу конечных элементов. Разработаны расчетные модели рельсов, элементов промежуточных рельсовых скреплений, шпал и балласта. При моделировании элементов железнодорожного пути учитывались конструктивная и физическая нелинейность их работы, наличие сил трения и односторонних связей между отдельными узлами и деталями.

Ключевые слова: моделирование, рельс, шпала, скрепление, балласт, экипаж.

The main principles of the construction and operation of the software complex for estimating the stress-strain state of structural elements of the upper structure of the track under the influence of spatial forces from the rolling stock are determined. The proposed software package is based on a step-by-step definition of the spatial forces of interaction between the dynamic system "crew way" and subsequent evaluation by the finite element method. As a computer implementation of the finite element method, the program "Lira" was adopted. Design models of rails, elements of intermediate rail fasteners, sleepers and ballast are developed. The modeling is based on the modular principle,

which allows, depending on the nature of the task, to calculate the section of the railway track, practically of any length. The structural and physical non-linearity of their work, the presence of frictional forces and one-way connections between individual nodes and details were taken into account when modeling railway track elements.

Keywords: modeling, rail, sleepers, fastening, ballast, carriage.

Вступ. Для визначення працездатності тієї або іншої конструкції колії в конкретних умовах експлуатації або для визначення сфер застосування того чи іншого елемента верхньої будови (типу рейок, шпал, проміжних скріплень, матеріалу і конструктивних характеристик баласту) потрібно знати їх напружено-деформований стан.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час, при розрахунках напружено-деформованого стану елементів колії [4, 10], розрахунок рейок зводиться в основному до розрахунків згинальних напружень в кромках головки і подошви під дією вертикальних, рідше – спільною дією вертикальних і горизонтальних сил. Однак, як показали дослідження, виконані в ЛПЗТ під керівництвом професора В. Ф. Яковлева [1-3, 14], не завжди кромкові напруги в рейках визначають їх критичний стан.

Розрахунки шпал, які застосовані в інженерній практиці для визначення їх працездатності при високих осьових навантаженнях, обмежуються, як правило, визначенням напружень в підрейковій зоні при вертикальних навантаженнях. Рідше, в основному на стадії конструювання, виконуються розрахунки напружено-деформованого стану залізобетонних шпал з використанням розрахункової схеми у вигляді балки змінного (три ділянки) перерізу, що спирається на суцільну пружну основу вінклерівського типу. Тертя по нижній постілі і бічних гранях, однобічність зв'язків шпал і баласту, нелінійність характеристик основи не враховуються. Дія горизонтальних поперечних сил замінюється дією зосереджених моментів, прикладених по середині підрейкової зони [7].

Визначення мети та завдання дослідження. При розрахунках напружень в баласті і на основній площадці земляного полотна використовується або метод пружного клина, або пружного півпростору. Розрахунки виконуються, як правило, тільки на дію вертикальних сил. Інші елементи колії не розраховуються.

Таким чином, прийняті в даний час у практиці розрахунків напружено-деформованого стану верхньої будови колії в умовах високих осьових навантажень способи і моделі розрахунків мають високий ступінь ідеалізації і припущень, які можуть істотно спотворювати реальний стан, давати занижені результати.

Отже, метою даного дослідження є спроба оцінити реальний напружено-деформований стан залізничної колії за рахунок використання методу скінченних елементів із попередньою розробкою розрахункових моделей конструктивних елементів верхньої будови колії.

Основна частина дослідження. В основу вибору методу та моделі розрахунку напружено-деформованого стану елементів верхньої будови колії були прийняті наступні основні положення і допущення [5, 8].

1. Рейки спираються на окремі опори – шпали, просторові сили взаємодії рейок і шпал мають пружно-дисипативний характер, у ряді випадків існує їх одностороння дія.

2. Між кромками подошви рейок і ребордами підкладок проміжних скріплень існують зазори. Між подошвою рейки і клемами, підрейковими прокладками, а також нашпальними прокладками і шпалами виникають як пружні сили, так і дисипативні сили тертя.

3. Залізобетонні шпали мають досить складну форму, яка може істотно впливати на напруження і деформації, що виникають.

4. Залізобетонні шпали виготовляються попередньо напруженими. Попереднє напруження арматури складає 1170 МПа, загальна сила напруження всієї арматури – не менше 364 кН [18], що необхідно враховувати при розрахунках.

5. Між бічними та нижніми поверхнями шпал і баластом виникають як нелінійні пружні сили, так і сили зчеплення і тертя.

6. Матеріал баласту підпорядковується нелінійному закону деформування з різними межами опору розтягування і стиснення.

7. Грунти основного майданчика земляного полотна, як баласт, мають нелінійні характеристики.

Повною мірою цим положенням відповідає метод скінченних елементів (МСЕ) [15, 16], що є розвитком енергетичних методів розрахунків інженерних конструкцій. МСЕ, завдяки інтенсивному розвитку засобів обчислювальної техніки, отримав широке розповсюдження і визнання, став одним з основних. Це зумовлено універсальністю підходів, що лежать в його основі. Тіло або конструкція, що деформується, розділяється на окремі елементи найпростішої форми, робота яких визначена. Напружено-деформований стан цих елементів з'єднується між собою так, щоб задовольнялися умови спільної деформації і умови рівноваги.

При розрахунках об'ємних тіл методом скінченних елементів в лінійній постановці задачі (рейки, підкладки та клеми проміжних скріплень, бетон і сталь шпал) при роботі з напруженнями, що не перевищують розрахункові опори використовуються залежності для тривимірного напруженого стану. Ці залежності є найбільш загальними, тому що вільні від різних гіпотез та передумов, характерних для деяких окремих задач (гіпотези

плоских перерізів для стрижнів, прямих нормалей для згинальних пластин і т. п.).

Для вирішення завдань тривимірного напруженого стану найбільш уживані кінцеві елементи у вигляді тетраедра, призми, паралелепіпеда, що мають по три невідомих вузлових переміщення в кожному вузлі і полілінійну апроксимацію переміщень u_x , u_y та u_z .

Матриці жорсткостей таких елементів наведені в ряді публікацій, наприклад, [6, 12, 15]. Бібліотека скінченних елементів, вбудована в програмний комплекс [16], дозволяє виконувати моделювання практично будь-яких конструкцій.

Слід підкреслити, що загальні принципи побудови моделі колії з застосуванням МСЕ практично повністю узгоджуються з прийнятою в [11, 13] загальною розрахунковою схемою колії як просторової конструкції у вигляді балок на багатьох пружних опорах-шпалах. Об'єднання програми розрахунку динамічної системи "екіпаж - колія" і програми розрахунку ділянки колії методом скінченних елементів утворює, по суті, програмний комплекс, здатний визначати напружено-деформований стан елементів верхньої будови колії практично в будь-яких умовах експлуатації залізничного транспорту.

Загальна логіка побудови і роботи такого програмного комплексу полягає в наступному.

На першому етапі розрахунків, при заданих характеристиках екіпажа та колії, визначаються просторові сили їх взаємодії, вертикальні і горизонтальні поперечні навантаження на шпали і, отже, згинальні і крутні моменти та поперечні сили в будь-яких потрібних перетинах рейок. На другому етапі розрахунків, з використанням моделей і програми розрахунків МСЕ, визначаються напружено-деформований стан елементів верхньої будови колії для заданого його відрізка. Вихідними даними розрахунків другого етапу є просторові сили впливу екіпажа на колію і, як граничні умови, внутрішні

згинальні і крутні моменти та поперечні сили в рейках на межах ділянки, прийнятого до розрахунків напружено-деформованого стану МСЕ.

Довжина такої ділянки може бути задана практично будь-якою, вона визначається характером розв'язуваної задачі і необхідною точністю розрахунків. Однак слід зазначити, що вирішення завдань з визначення напружено-деформованого стану в нелінійній постановці та з урахуванням односторонніх зв'язків, що виникають у конструкції, вимагає досить тривалих розрахунків і час розрахунків зростає в геометричній прогресії при збільшенні довжини ділянки, що розраховується. Так, наприклад, розрахунок відрізка колії довжиною 1,1 км на двох шпалах займає більше двох годин, довжиною 2,2 км на чотирьох шпалах – понад вісім і т. д.

Як комп'ютерна реалізація методу скінченних елементів в роботі був

використаний програмний комплекс для розрахунків і проектування конструкцій «ЛІРА» [15, 16].

В основі моделювання колії МСЕ був прийнятий модульний принцип, при якому модуль складається з двох відрізків рейок, довжина яких дорівнює 1300, 1100 або 1000 мм (для решітки з епюр шпал 1600, 1840 і 2000 шт./км), і двох залізобетонних шпал, до яких рейки прикріплюються проміжними скріпленнями типу КБ. У залежності від характеру поставленої задачі і необхідної точності розрахунків загальна модель колії може складатися з одного, двох, трьох і більше модулів. Модулі з'єднуються між собою або з прилеглими ділянками колії за допомогою граничних умов кожного модуля – згинальні і крутні моменти та поперечні сили, які включені у вузли, розташовані в нейтральній осі перерізу рейки (рис. 1).

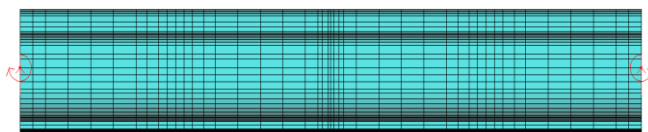


Рис. 1. Схема граничних умов модуля рейки

Передача навантажень від колісних пар може виконуватися в будь-якому модулі через грані скінченних елементів (СЕ), розташованих на поверхні кочення і на внутрішніх робочих гранях головки рейки (рис. 2). Передбачається можливість

вертикального завантаження рейок з будь-яким ексцентриситетом. Площа зони контакту між поверхнею катання колеса, робочою гранню його реборди та відповідними поверхнями рейки встановлюються в залежності від їх зносу.

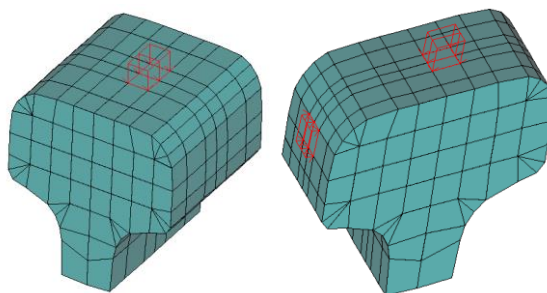


Рис. 2. Схеми контактних майданчиків коліс і рейок

Рейки моделювалися за допомогою двох типів СЕ:

- СЕ 34 універсальний просторовий шестивузловий ізопараметричний;

- СЕ 34 універсальний просторовий восьмивузловий ізопараметричний.

Ці СЕ призначені для визначення напружено-деформованого стану континуальних об'єктів і масивних просторових конструкцій з однорідного ізотропного лінійно-пружного матеріалу в постановці тривимірної задачі теорії пружності. У параметри жорсткості цих СЕ входять модуль пружності рейкової сталі, коефіцієнт Пуассона і щільність матеріалу для врахування його власної ваги.

Розбивка поперечного перерізу рейки на СЕ показана на рис. 3.

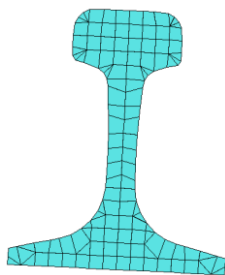


Рис. 3. Розбивка поперечного перерізу рейки на СЕ

Контактування підшви рейки і підрейкової прокладки виконано за допомогою СЕ 265, який призначений для моделювання контактної задачі. Цей скінченний елемент двовузловий односторонніх пружних зв'язків. У кожному вузлі встановлено по шість ступенів свободи, що визначаються щодо осей глобальної системи координат. Таким чином, за допомогою цього СЕ можна моделювати як лінійні, так і кутові зв'язки щодо осей X , Y , Z . СЕ 265 дозволяє враховувати нерівні граничні (прямі і протилежні) зусилля у зв'язках, наприклад, граничне зусилля розтягування у зв'язку можна задавати не рівним зусиллю стиснення. При розрахунках в моделях в

цих скінченних елементах визначаються зусилля у зв'язках, накладених вздовж відповідних осей глобальної системи. Знаки цих зусиль визначаються знаками різниць відповідних переміщень або поворотів.

У параметри жорсткості СЕ 265 входить одностороння жорсткість на стиск вздовж вертикальної осі і одностороння горизонтальна жорсткість, що моделює в даному випадку тертя між нижньою межею підшви рейки і підрейковою прокладкою. Розміщення СЕ 265 показано на рис. 4.

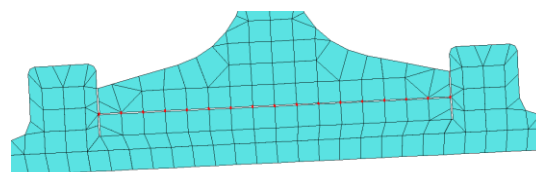


Рис. 4. Моделювання тертя підшви рейки по підрейковій прокладці і контактної задачі між гранями підшви і ребрами підкладки

Характеристики СЕ 265 дозволили також виконати моделювання контактування між боковими гранями підшви рейки і ребрами підкладки (рис. 4). У цьому випадку використана така характеристика цього СЕ, як одностороння жорсткість на стиск. Щоб уникнути ефекту заклинювання підшви рейки між ребрами при поворотах рейки, в параметри жорсткості СЕ 265 був введений зазор – величина допустимих деформацій у напрямку одnobічного зв'язку. Тільки після вибірки зазора СЕ включається в роботу. Величина зазора була прийнята рівною 1 мм, що відповідає конструктивному зазору між бічними гранями підшви рейки і ребрами.

Підрейкова і нащпальна (рис. 5) прокладки моделювалися з використанням СЕ 34 і СЕ 36 – універсальні просторові ізопараметричні шести – і восьмивузлові кінцеві елементи. При цьому коефіцієнт Пуассона, з урахуванням рифлень

прокладок, приймався рівним $0,32 \div 0,41$, а наведений модуль пружності прокладок визначався так:

$$E = \frac{U_{np}^{дин} \cdot h}{F}, \text{ МПа,}$$

де $U_{np}^{дин}$ – жорсткість прокладки при її динамічному стисканні, Н/м;

F – опорний майданчик прокладки, м²;

h – товщина прокладки, м.

Значення жорсткості прокладок при динамічних напругах прийняті за результатами досліджень, викладені в [9, 17].

Моделювання підкладок і жорстких клем також виконано із застосуванням СЕ

34 і СЕ 36. При цьому моделюванні модуль пружності, коефіцієнт Пуассона і щільність прийняті для конструкційної сталі Ст 7, з якої виготовляються ці елементи (рис. 6, 7).

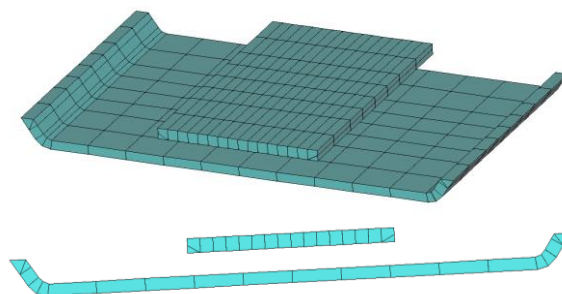


Рис. 5. Моделі підрейкової і нашпальної прокладок

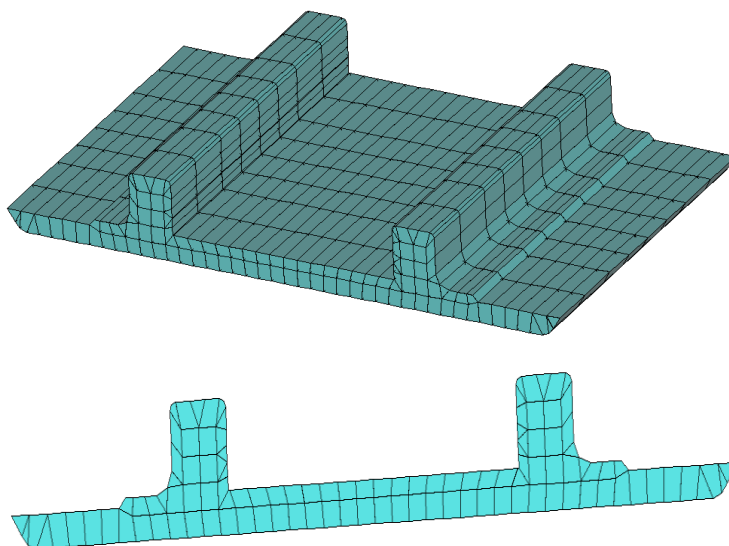


Рис. 6. Модель підкладки скріплення КБ

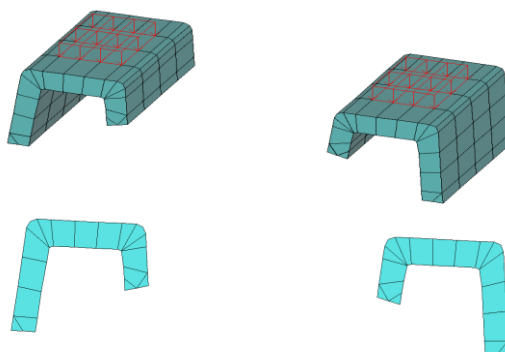


Рис. 7. Модель жорсткої клеми скріплення КБ

Зусилля, що передаються на підкладки при закручуванні гайок закладних і клемних болтів, задавалися навантаженням вузлів, розташованих на місці отворів для закладних болтів і пазів реборд підкладок. Отвори для закладних болтів, пази реборд і самі заставні та клемні болти не моделювалися. Кріплення підкладки до шпал моделюється об'єднанням переміщень відповідних вузлів, розташованих на осі закладного болта.

Передача навантаження на клеми від клемних болтів виконана через грані дев'яти СЕ загальною площею 8 см^2 . Рівнодійна цього рівномірно розподіленого навантаження відповідає силі натягу клемного болта.

Контактні задачі між клемами і підкладкою, клемами і підшовою рейки вирішувалися за допомогою СЕ 252 (рис. 8). Цей двовузловий СЕ однобічного зв'язку з урахуванням граничного зусилля призначений для моделювання одностороннього (сприймаючого або розтягування, або стиснення) лінійного зв'язку між двома контактуючими поверхнями. Напрямок зв'язків вибудовується відповідно до координат вузлів, що описують ці СЕ, і збігається з поздовжньою віссю x_1 . Оскільки в конструкції скріплення клеми притискають рейки до підкладки, у параметри жорсткості СЕ 252 включена жорсткість контактів клеми - підшова рейки і клема - підкладка на стиск.

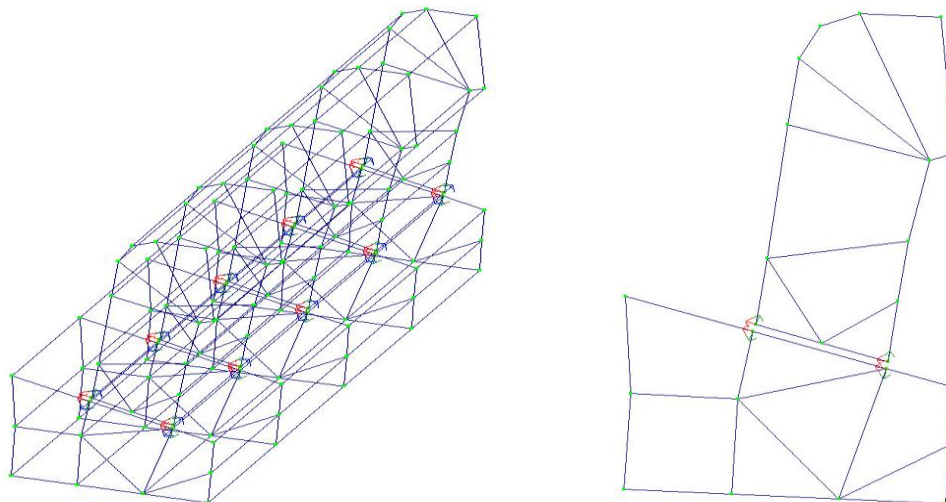


Рис. 8. Локальні зв'язки вузлів СЕ 252

Контактна задача взаємодії клем і реборд підкладок вирішена за допомогою СЕ 265, в параметри жорсткості яких була включена тільки жорсткість контакту на розтяг, яка моделює роботу клемного болта разом з пружинною шайбою.

Загальний вигляд моделі вузла скріплення КБ, в якій враховані всі викладені вище особливості його роботи, наведено на рис. 9.

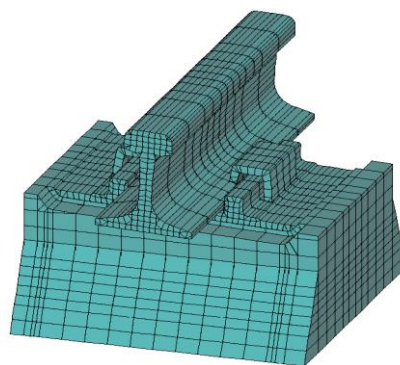


Рис. 9. Модель вузла скріплення КБ

При моделюванні залізобетонної шпали (рис. 10) були використані три типи скінченних елементів. У параметри жорсткості SE 34 і SE 36, про які вже йшлося вище, були включені модуль

пружності, коефіцієнт Пуассона і щільність бетону. SE 10 – універсальний стрижневий елемент, який моделює роботу арматури, в тому числі зусиль попереднього натягу.

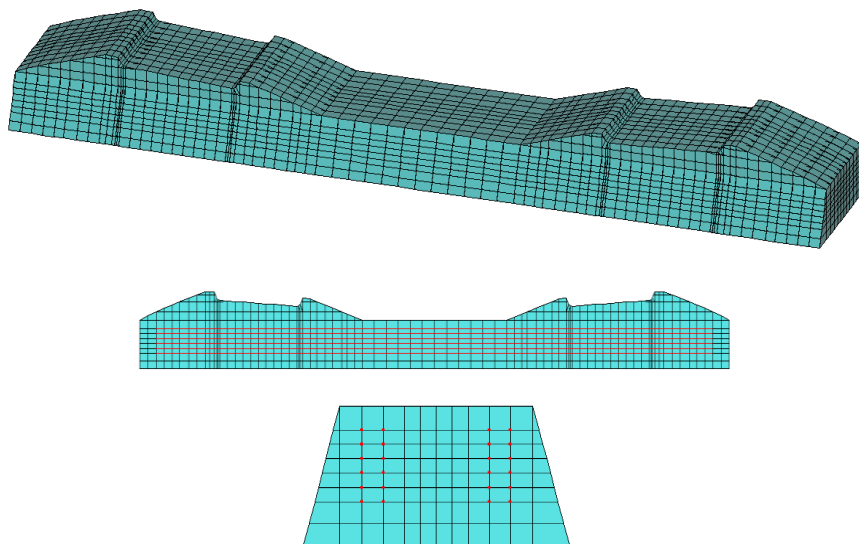


Рис. 10. Модель залізобетонних шпал Ш-1

Баласт моделювався з використанням трьох типів SE (рис. 11):

- SE 274 – фізично нелінійний об’ємний шестивузловий ізопараметричний елемент ґрунту (довільна трикутна призма);
- SE 274 – фізично нелінійний об’ємний восьмивузловий ізопараметричний елемент ґрунту (довільний гексаедр);
- SE 56 – одновузловий скінченний елемент пружних зв’язків.

SE 274 і SE 276 призначені для моделювання односторонньої роботи, в даному випадку, баласту на стиск з

урахуванням зсуву. У параметрах жорсткості цих SE задаються:

- E – модуль деформації баласту по гілці первинного навантаження, МПа;
- ν – коефіцієнт Пуассона;
- k_e – коефіцієнт переходу до модуля деформації по гілці вторинного навантаження;
- c – зчеплення баласту, кН/м²;
- R_t – максимальне навантаження при розтягненні, МПа;
- φ – кут внутрішнього тертя баласту, °;
- δ_p – максимальне напруження стиску, МПа.

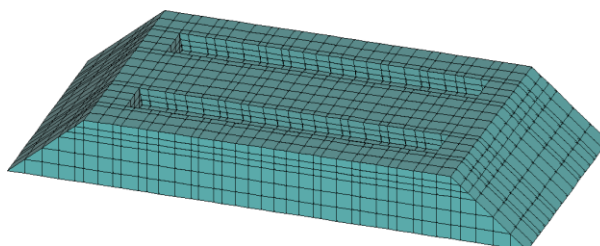


Рис. 11. Модель модуля баласту

СЕ 56 – одновузловий скінченний елемент, застосовується для введення пружних зв'язків вздовж або навколо глобальних або локальних осей координат вузла. У моделі модуля залізничної колії

застосовується для моделювання реакцій основного майданчика земляного полотна.

Загальний вигляд моделі модуля залізничної колії подано на рис. 12.

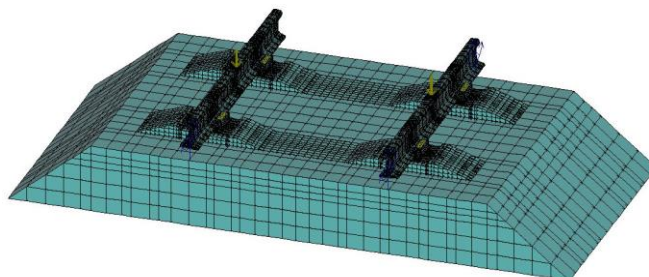


Рис. 12. Загальна розрахункова схема моделі модуля колії

Досвід використання запропонованої моделі при розрахунках напружено-деформованого стану елементів верхньої будови колії в умовах високих осьових навантажень показав її високу ефективність і добру збіжність результатів розрахунків з даними експериментальних робіт.

Висновки:

1. Визначено основні положення і допущення розрахунків просторового напружено-деформованого стану елементів верхньої будови колії, вимоги до методу розрахунків. Таким допущенням і вимогам повною мірою відповідає метод скінченних елементів (МСЕ).

2. Як комп'ютерна реалізація МСЕ в роботі прийнятий програмний комплекс «Ліра».

3. Розроблено розрахункові моделі МСЕ рейок, елементів проміжних скріплень, шпал і баласту. В основу моделювання покладено модульний принцип, який дозволяє, в залежності від характеру поставленого завдання, розраховувати ділянки колії практично будь-якої довжини.

4. При моделюванні елементів колії враховувалися конструктивна і фізична нелінійність їх роботи, наявність сил тертя і односторонніх зв'язків між окремими вузлами і деталями.

5. Поєднання раніше розробленої у вигляді програми розрахунків динамічної моделі взаємодії рухомого складу і колії і запропонованої в роботі моделі колії МСЕ утворює програмний комплекс, здатний визначати характер роботи колії практично в будь-яких умовах експлуатації.

Список використаних джерел

1. Яковлев, В. Ф. Исследование сил взаимодействия колеса и рельса с учетом нелинейных односторонних связей и переменных масс [Текст] / В. Ф. Яковлев, И. И. Семенов // Труды ЛИИЖТ. – 1964. – № 238. – С. 46-95.

2. Яковлев, В. Ф. Исследование упруго-динамических характеристик пути и определение динамических вертикальных сил в крестовине [Текст] / В. Ф. Яковлев, И. И. Семенов // Труды ЛИИЖТ. – 1967. – № 222. – С. 17-29.

3. Яковлев, В. Ф. Расчет рельсо-шпальной решетки железнодорожного пути как пространственной системы [Текст] / В. Ф. Яковлев, И. И. Семенов, Н. С. Никеров // Труды ЛИИЖТ. – 1969. – № 296. – С. 3-15.
4. Даренський, О. М. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничних колій [Текст] / О. М. Даренський, Е. А. Беліков // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 154. – С. 149-155.
5. Даренський, О. М. Застосування методу кінцевих елементів для визначення раціональних способів посилення рейко-шпальної основи [Текст] / О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків, 2015. – № 4. – С. 20-26.
6. Вітольберг, В. Г. Моделювання роботи залізобетонних шпал типу СБ 3-0 методом скінченних елементів [Текст] / В. Г. Вітольберг // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 148 (Т.2). – С. 175-180.
7. Вітольберг, В. Г. Чисельні дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних шпал типу СБ 3-0 в умовах промислового транспорту [Текст] / В. Г. Вітольберг // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків, 2015. – № 2. – С. 14-18.
8. Даренський, О. М. Моделювання рейко-шпальної основи залізниць незагального користування методом кінцевих елементів [Текст] / О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць А. М. Бадражан // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 147. – С. 113-118.
9. Даренский, А. Н. Жесткость боковых упоров промежуточных скреплений КБ [Текст] / А. Н. Даренский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків, 2013. – № 2. – С. 3-4.
10. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість [Текст] / Е. І. Даніленко, В. В. Рябкін. – К. : Транспорт України (ЦП - 0117), 2006. – 168 с.
11. Говоруха, В. В. Механика деформирования и разрушения упругих элементов промежуточных рельсовых скреплений [Текст]: монография / В. В. Говоруха. – Днепропетровск : “Лира-ЛТД”, 2005. – 388 с.
12. Vatulia Glib. Simulation of performance of circular CFST columns under short-time and long-time load [Text] / G. Vatulia, A. Lobiak, Ye. Orel // Transbud'2017 – MATEC Web of Conferences 116, 02036 (2017).
13. Бугаєць, Н. В. Результати експериментальних робіт з визначення напружень у баластному шарі і на основній площадці земляного полотна в умовах промислового залізничного транспорту [Текст] / Н. В. Бугаєць // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 119. – С.199–204.
14. Yusef Tuley, Darenskiy A.N., Natalia Bugaets, Alina Malishevskay Research into parameters of energy loss when trains influence the track with wooden sleepers [Text] // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2016. – А 6/1 (84). – С. 9-13.
15. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций ЛИРА версия 9.0: Кн. 1: Основные теоретические и расчетные положения [Текст]: руководство пользователя. – К. : НИИ АС, 2002. – 147 с.
16. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций ЛИРА версия 9.0 : Кн. 2: Путеводитель [Текст]: руководство пользователя. – К. : НИИ АС, 2002. – 189 с.
17. Даренський, О. М. Експериментальне визначення пружних характеристик прокладок проміжних скріплень КБ [Текст] / О. М. Даренський, В. Г. Вітольберг // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – Вип. 87. – С. 172-178.

18. ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови [Текст] : Введ. 14.03.16. – К.: Минрегион України, 2016. – 37 с.

Панченко Сергій Володимирович, д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел.: (057) 730-10-13. E-mail: info@kart.edu.ua.

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: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Лобяк Олексій Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-70. E-mail: bmg@kart.edu.ua.

Sergii Panchenko, Dr. Sc. Science, Department of automation and computer-integrated technologies Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-13. E-mail: info@kart.edu.ua.

Alexander Darenskiy, 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.

Oleksii Lobiak, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Structural Mechanics and Hydraulics Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-70. E-mail: bmg@kart.edu.ua.

Стаття прийнята 26.12.2017 р.

УДК 625.03

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІЇ ТА РУХОМОГО СКЛАДУ ПРИ ДИСКРЕТНІЙ ПІДРЕЙКОВІЙ ОСНОВІ В ЗОНІ РЕЙКОВИХ СТИКІВ

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, кандидати техн. наук Н. В. Бугаєць, А. В. Клименко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ ДИСКРЕТНОМ ПОДРЕЛЬСОВОМ ОСНОВАНИИ В ЗОНЕ РЕЛЬСОВЫХ СТЫКОВ

Д-р техн. наук И. Э. Мартынов, кандидаты техн. наук Н. В. Бугаец, А. В. Клименко

SIMULATION OF INTERACTION OF THE WAY AND MOBILE COMPOSITION UNDER A DISCRETE SUB-FRAMEWORK BASIS IN THE AREA OF RAIL JOBS

Dr. sc. sciences I. E. Martynov, phd. tehn. N. V. Bugaets, A. V. Klymenko

Розроблено математичну модель для оцінювання напруженого стану рейок у зоні рейкових стиків. За розрахункову схему залізничної колії прийнято балку на окремих дискретних пружно-дисипативних опорах з нелінійними характеристиками. Запропонована модель дає змогу визначити рівень вертикальних динамічних сил взаємодії рухомого складу і колії в зоні стиків унаслідок зміни жорсткості рейкової нитки в цій зоні.

Ключові слова: жорсткість, рейка, стик, шпала, взаємодія.

Разработана математическая модель для оценки напряженного состояния рельсов в зоне рельсовых стыков. В качестве расчетной схемы железнодорожного пути в работе принята балка на отдельных дискретных упруго-диссипативных опорах с нелинейными характеристиками. Предложенная модель позволяет определить уровень вертикальных

динамических сил взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути в зоне стыка вследствие изменения жесткости рельсовой нити в этой зоне.

Ключевые слова: жесткость, рельс, стык, шпала, взаимодействие.

A mathematical model is developed for estimating the stress state of rails in the zone of rail joints. As a design scheme of the railway track, a beam is adopted in the work on discrete elastically dissipative supports with nonlinear characteristics, which makes it possible to take into account the effect of changes in the flexural rigidity of the rails on the interaction of the rolling stock and the entire structure of the upper structure of the track. The proposed model makes it possible to determine the level of the vertical dynamic forces of interaction between the rolling stock and the path in the junction zone, due to a change in the flexural rigidity of the rail thread in this zone. The obtained results can be used for a reliable assessment of the possibility of introducing new railway track structures and new types of rolling stock.

Keywords: rigidity, rail, joint, sleepers, interaction.

Вступ. Дослідження роботи залізничної колії під дією навантаження від рухомого складу числовими методами дає змогу отримувати інформацію про особливості впливу на колію та особливості напружено-деформованого стану всієї конструкції в різних умовах експлуатації при значно менших матеріальних і фінансових витратах у порівнянні з експериментальними методами. Числові методи так само дають можливість точно визначати вихідні розрахункові дані, що практично неможливо при проведенні експериментальних робіт.

Однак застосовувати числові методи можливо тільки тоді, коли математичні моделі адекватно відображають реальну роботу як динамічної системи «екіпаж-колія», так і конструкцію колії. Це повною мірою стосується моделювання взаємодій колії та рухомого складу в зонах рейкових стиків, оскільки теоретичні та експериментальні дослідження показали, що рівень динамічної дії на колію в стиках зростає в 1,5–2 рази. Отже, моделювання роботи рейкової нитки під дією вертикального навантаження в зоні стику є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні найбільш вживаною є модель колії, при якій рейки подані у вигляді балок нескінченної довжини, що спираються на суцільну

пружну основу. На підставі теоретичних досліджень Е. М. Бромберга, М. Ф. Вериги, А. Я. Когана, Г. М. Шахунянца [1–4] та інших учених розроблені математичні моделі взаємодії колії та рухомого складу, напружено-деформованого стану колії, які базуються на цій розрахунковій схемі. Численні експериментальні дослідження показали, що для умов магістральних залізниць теоретичні й експериментальні результати мають хорошу збіжність.

Однак низка учених (К. Д. Белих [5], Н. С. Нікеров [6] та ін.) вважають, що для умов промислових залізниць така розрахункова схема надмірно ідеалізує колію та її технічний стан. В. В. Рибкін, розраховуючи колію як балку на багатьох пружних опорах зі змінними характеристиками жорсткості під дією статичного навантаження, показав, що застосування методів пружної основи дає занижені на 17–24 % результати [7, 15].

У роботі [8] наведено математичні моделі динамічної системи «екіпаж - колія», в основі яких прийнята розрахункова схема колії як балки на багатьох пружно-дисипативних опорах з нелінійними характеристиками. Реалізація цих моделей у програмній системі Mathcad дає змогу визначати просторові сили впливів екіпажів на колію в умовах промислового транспорту. Однак робота колії в зоні рейкових стиків в цій роботі не розглядалася.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є розроблення адекватної, з точки зору реальних процесів взаємодії динамічної системи «екіпаж - колія», математичної моделі роботи рейок у зоні стику під дією вертикальних динамічних сил від рухомого складу. Для досягнення поставленої мети було вирішене завдання з визначення зміни жорсткості рейкової нитки в специфічній зоні рейкового стику.

Основна частина дослідження. У працях [8, 13, 14] вертикальні сили взаємодії екіпажа і колії з використанням припущень про пружно-дисипативні характеристики колії були визначені як

$$R_i = C_\epsilon (y_p) + \beta_\epsilon (\dot{y}_p) \cdot \text{sign } \dot{y}_p,$$

де C_ϵ – приведена вертикальна жорсткість рейкової нитки в точці контакту, Н/м;

y_p – вертикальний вигин рейки під колесом, м;

β_ϵ – параметр розсіювання енергії конструкцією колії у вертикальній площині, $\left(\frac{H \cdot c^2}{m}\right)$.

Перший доданок у правій частині цієї формули є пружною складовою – дисипативною складовою вертикальних сил взаємодії. Тоді цю формулу можна записати у такому вигляді:

$$R = R_{yn} + R_{disc}. \quad (2)$$

Далі, на початковому етапі, розглядалася робота колії під дією тільки пружної складової R_{yn} :

$$R = R_{yn} = C_\epsilon (y_p). \quad (3)$$

Величина приведеної вертикальної жорсткості до точки контакту колеса і рейки (згідно з рис. 1), яка необхідна для подальших розрахунків, була визначена таким чином. При цьому наголошується, що ця величина є змінною в процесі руху екіпажа, нелінійною та залежною як від жорсткості всіх рейкових опор, так і від місця розташування колеса щодо цих опор.

$$C_\epsilon = \frac{1}{y_{edp}}, \quad (4)$$

де y_{edp} – прогин рейкової нитки під дією одиничної сили $R_{edyn}=1$.

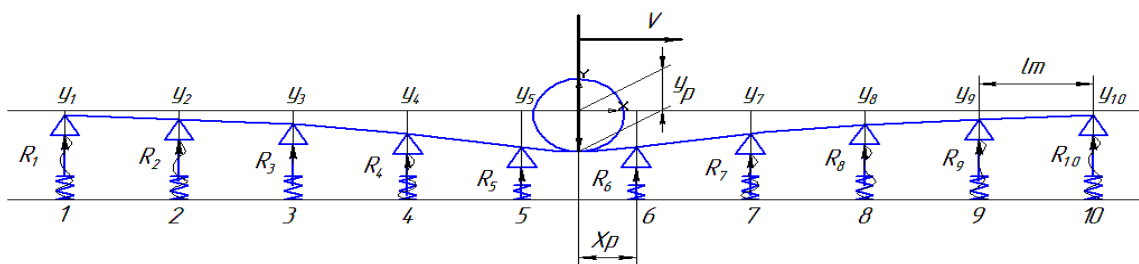


Рис. 1. Розрахункова схема рейкової нитки на пружних опорах під дією рухомої сили

Величину прогину рейкової нитки під дією одиничної сили можна визначити як

$$y_{edp} = y_5 \frac{x_p}{l_u} + y_6 \frac{(\ell_u - x_p)}{\ell_u} + \frac{(\ell_u - x_p)^2 x_p^2}{3EI \ell_u}, \quad (5)$$

де y_i – пружні осідання рейкових опор;

ℓ_u – відстань між опорами;

x_p – відстань від найближчої опори до точки прикладання сили R_{edyn} ;

$$X_p = \ell_u \left(1 - \left\{ \frac{x_{ni}}{\ell_u} \right\} \right), \quad (6)$$

де ℓ_u – відстань між опорами, м;

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

Пружні осідання рейкових опор були визначені з використанням рівнянь п'яти моментів як

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \frac{1}{c \cdot \ell_u} (M_2 - 2M_1) \\ y_2 &= \frac{1}{c \cdot \ell_u} (M_3 - 2M_2 + M_1) \\ y_3 &= \frac{1}{c \cdot \ell_u} (M_4 - 2M_3 + M_2) \\ y_4 &= \frac{1}{c \cdot \ell_u} (M_5 - 2M_4 + M_3) \\ y_5 &= \frac{1}{c \ell_u} [(\ell_u - x_p)R_{yn} + M_6 - 2M_5 + M_4] \\ y_6 &= \frac{1}{c \cdot \ell_u} (x_p R_{yn} + M_7 - 2M_6 + M_5) \\ y_7 &= \frac{1}{c \cdot \ell_u} (M_8 - 2M_7 + M_6) \\ y_8 &= \frac{1}{c \cdot \ell_u} (M_9 - 2M_8 + M_7) \\ y_9 &= \frac{1}{c \cdot \ell_u} (M_{10} - 2M_9 + M_8) \\ y_{10} &= \frac{1}{c \cdot \ell_u} (-2M_{10} + M_9) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Невідомі опорні моменти M_i визначалися в матричній формі з використанням рівнянь Крамера у такому вигляді:

$$M_i = \frac{\tilde{\Delta}_j}{\Delta_j} \cdot R_{\text{едуп}}, \quad (8)$$

де Δ_j – визначник матриці відносних жорсткостей рейок і рейкових опор;

$\tilde{\Delta}_j$ – визначник матриці вільних членів системи рівнянь п'яти моментів.

Для розрахункової схеми, наведеної на рис. 1, матриця жорсткостей отримана у такому вигляді:

$$A = \begin{pmatrix} 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 1+4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha \end{pmatrix} \quad (9)$$

Розв'язуючи задачу про взаємодію екіпажа та колії методом Рунге - Кутта в кожній точці інтегрування загальної системи рівнянь, розраховувалися невідомі опорні моменти для загальної розрахункової схеми (рис. 1). Далі визначалися пружні прогини рейкової нитки в точці контакту колеса й рейки і таким чином визначалася приведена жорсткість рейкової нитки.

Якщо визначити в числовому вигляді значення швидкостей деформацій усіх рейкових опор, можна розрахувати також наведений коефіцієнт дисипації колії, який, як і жорсткість, є змінним у процесі руху і нелінійним.

Матриця жорсткостей рейкової нитки (9), складена для розрахункової схеми (рис. 1), отримана з умови постійної жорсткості рейки у всіх прольотах. Однак у

зоні рейкового стику жорсткість рейкової нитки буде іншою. На цей параметр будуть впливати значення сумарної жорсткості стикових накладок, рівень натягу стикових болтів, наявність стикового зазора.

Для урахування такої особливості будови колії розглянемо роботу рейкової нитки при наявності рейкового стику при дії вертикальної сили. Оскільки зміна згинальної жорсткості рейки впливає на приведену у точці контакту вертикальну жорсткість залежно від відстані точки контакту до стику, необхідно розглянути декілька розрахункових схем. У першому випадку вертикальна сила перебуває в п'ятому прольоті від стику.

Розрахункова схема в цьому випадку буде мати вигляд (рис. 2).



Рис. 2. Розрахункова схема першого варіанта навантаження

Запишемо рівняння п'яти моментів для кожної з десяти опор:

$$\begin{aligned}
 &\text{для 1-ї опори: } M_1(4 + 6\alpha) + M_2(1 - 4\alpha) + M_3\alpha + 0 \dots = 0 \\
 &\text{для 2-ї опори: } M_1(1 - 4\alpha) + M_2(4 + 6\alpha) + M_3(1 - 4\alpha) + M_y\alpha + 0 \dots = 0 \\
 &\text{для 3-ї опори: } M_1\alpha + M_2(1 - 4\alpha) + M_3(4 + 6\alpha) + M_4(1 - 4\alpha) + M_5 \cdot \alpha + 0 \dots = 0 \\
 &\text{для 4-ї опори: } 0 + M_2\alpha + M_3(1 - 4\alpha) + M_4(4 + 6\alpha) + M_5(1 - 4\alpha) + M_6\alpha + 0 \dots = 0 \\
 &\text{для 5-ї опори:} \\
 &\quad \dots 0 + M_3\alpha + M_4(1 - 4\alpha) + M_5(4 + 6\alpha) + M_6(1 - 4\alpha) + M_7\alpha + 0 \dots = \\
 &\quad = -\frac{R_{yni}}{\ell_{uu}^2} x_p (\ell_{uu} - x_p) \cdot x_p (2\ell_{uu} - x_{pi}) + R_{yni} [2\alpha x_{pi} - \alpha (\ell_{uu} - x_{pi})] \\
 &\text{для 6-ї опори:} \\
 &\quad 0 + M_4\alpha + M_5(1 - 4\alpha) + M_6(4 + 6\alpha) + M_7(1 - 4\alpha) + M_8\alpha + 0 \dots = \\
 &\quad = -\frac{R_{yni}}{\ell_{uu}^2} (\ell_{uu} - x_{pi}) \cdot x_{pi} (2\ell_{uu} - x_{pi}) + R_{yni} [2\alpha (\ell_{uu} - x_{pi}) - \alpha x_{pi}] \\
 &\text{для 7-ї опори:} \\
 &\quad \dots 0 + M_5\alpha + M_6(1 - 4\alpha) + M_7(4 + 6\alpha) + M_8(1 - 4\alpha) + M_9\alpha + 0 \dots = 0 \\
 &\text{для 8-ї опори: } \dots 0 + M_6\alpha + M_7(1 - 4\alpha) + M_8(4 + 6\alpha) + M_9(1 - 4\alpha) + M_0\alpha_{st} = 0 \\
 &\text{для 9-ї опори: } \dots 0 + M_7\alpha + M_8(1 - 4\alpha) + M_9(4 + 6\alpha) + M_{10}(1 - 4\alpha_{st}) = 0 \\
 &\text{для 10-ї опори: } \dots 0 + M_8\alpha + M_9(1 - 4\alpha) + M_{10}(4 + 6\alpha_{st}) = 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

У цьому випадку матриця жорсткостей матиме такий вигляд:

$$A_2 = \begin{pmatrix}
 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \alpha & 1 + 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha_{st} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha_{st} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha_{st}
 \end{pmatrix} \tag{11}$$

У цих формулах α_{st} – коефіцієнт відносної жорсткості рейки і рейкової опори в зоні стикового прольоту:

$$\alpha_{st} = \frac{6EI_{st}}{l_s^3 C_y}, \tag{12}$$

де E – модуль пружності рейкової сталі;

I_{st} – момент інерції рейки при вертикальному вигині в стиковому прольоті з урахуванням роботи накладок;

C_y – вертикальна жорсткість рейкової опори;

l_s – відстані між опорами в стиковому прольоті.

Далі вертикальна сила перебуває в четвертому прольоті від стику (рис. 3).

Рівняння п'яти моментів для кожної з десяти опор матимуть такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 &\text{для 1-ї опори: } M_1(4 + 6\alpha) + M_2(1 - 4\alpha) + M_3\alpha + 0 \dots = 0 \\
 &\text{для 2-ї опори: } M_1(1 - 4\alpha) + M_2(4 + 6\alpha) + M_3(1 - 4\alpha) + M_y\alpha + 0 \dots = 0 \\
 &\text{для 3-ї опори: } M_1\alpha + M_2(1 - 4\alpha) + M_3(4 + 6\alpha) + M_4(1 - 4\alpha) + M_5 \cdot \alpha + 0 \dots = 0 \\
 &\text{для 4-ї опори: } 0 + M_2\alpha + M_3(1 - 4\alpha) + M_4(4 + 6\alpha) + M_5(1 - 4\alpha) + M_6\alpha + 0 \dots = 0 \\
 &\text{для 5-ї опори:} \\
 &\quad \dots 0 + M_3\alpha + M_4(1 - 4\alpha) + M_5(4 + 6\alpha) + M_6(1 - 4\alpha) + M_7\alpha + 0 \dots = \\
 &\quad = -\frac{R_{yni}}{\ell_u^2} x_p (\ell_u - x_p) \cdot x_p (2\ell_u - x_{pi}) + R_{yni} [2\alpha x_{pi} - \alpha (\ell_u - x_{pi})] \\
 &\text{для 6-ї опори:} \\
 &\quad 0 + M_4\alpha + M_5(1 - 4\alpha) + M_6(4 + 6\alpha) + M_7(1 - 4\alpha) + M_8\alpha + 0 \dots = \\
 &\quad = -\frac{R_{yni}}{\ell_u^2} (\ell_u - x_{pi}) \cdot x_{pi} (2\ell_u - x_{pi}) + R_{yni} [2\alpha (\ell_u - x_{pi}) - \alpha x_{pi}] \\
 &\text{для 7-ї опори: } \dots 0 + M_5\alpha + M_6(1 - 4\alpha) + M_7(4 + 6\alpha) + M_8(1 - 4\alpha) + M_9\alpha_{st} + 0 \dots = 0 \\
 &\text{для 8-ї опори: } \dots 0 + M_6\alpha + M_7(1 - 4\alpha) + M_8(4 + 6\alpha) + M_9(1 - 4\alpha_{st}) + M_{10}\alpha_{st} = 0 \\
 &\text{для 9-ї опори: } \dots 0 + M_7\alpha + M_8(1 - 4\alpha) + M_9(4 + 6\alpha_{st}) + M_{10}(1 - 4\alpha_{st}) = 0 \\
 &\text{для 10-ї опори: } \dots 0 + M_8\alpha + M_9(1 - 4\alpha_{st}) + M_{10}(4 + 6\alpha_{st}) = 0
 \end{aligned} \tag{13}$$

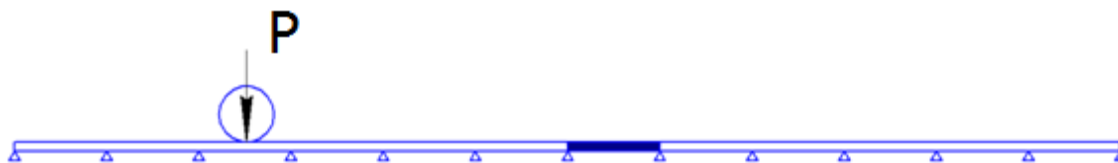


Рис. 3. Розрахункова схема другого варіанта навантаження

У цьому випадку матриця жорсткостей буде такою:

$$A_3 = \begin{pmatrix}
 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \alpha & 1 + 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha & \alpha_{st} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha & 1 - 4\alpha_{st} & \alpha_{st} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha & 4 + 6\alpha_{st} & 1 - 4\alpha_{st} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1 - 4\alpha_{st} & 4 + 6\alpha_{st}
 \end{pmatrix} \tag{14}$$

Тут усі позначення попередні.

Отже, у міру наближення колеса до стикового прольоту матриці жорсткостей будуть змінюватися таким чином:

- колесо перебуває в третьому прольоті від стику:

$$A_3 = \begin{pmatrix} 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 1+4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha_{st} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha_{st} & \alpha_{st} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha_{st} & 1-4\alpha_{st} & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha_{st} & 4+6\alpha_{st} & 1-4\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha_{st} & 4+6\alpha \end{pmatrix} \quad (15)$$

- у другому прольоті:

$$A_3 = \begin{pmatrix} 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 1+4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha_{st} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha_{st} & \alpha_{st} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha_{st} & 1-4\alpha_{st} & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha_{st} & 4+6\alpha_{st} & 1-4\alpha & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{st} & 1-4\alpha_{st} & 4+6\alpha & 1-4\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{st} & 1-4\alpha & 4+6\alpha \end{pmatrix} \quad (16)$$

- у першому прольоті:

$$A_3 = \begin{pmatrix} 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 1+4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha_{st} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha_{st} & \alpha_{st} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha_{st} & 1-4\alpha_{st} & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha_{st} & 4+6\alpha_{st} & 1-4\alpha & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{st} & 1-4\alpha_{st} & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{st} & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha \end{pmatrix} \quad (17)$$

- колесо перебуває в стиковому прольоті:

$$A_3 = \begin{pmatrix} 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 1+4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha_{st} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha_{st} & \alpha_{st} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha_{st} & 1-4\alpha_{st} & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha_{st} & 4+6\alpha_{st} & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{st} & 1-4\alpha_{st} & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{st} & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 1-4\alpha & 4+6\alpha & 1-4\alpha \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Далі, у міру віддалення від стикового прольоту, матриці будуть симетрично змінюватися у зворотний бік.

Складаючи визначники матриці жорсткості і визначники матриці зовнішнього завантаження, поодинокі опорні моменти розраховуємо за формулою

$$M_i = \frac{\Delta_j}{\Delta}. \quad (19)$$

Знаючи поодинокі опорні моменти, розраховуються пружні поодинокі прогини опор (система рівнянь (7)), поодинокі прогини в точці дії навантаження (формула (5)) і наведені вертикальні жорсткості рейкової нитки, які необхідно визначити. Ці значення використовуються в розрахунках

вертикальних динамічних сил взаємодії за описаною вище методикою.

Висновки. Отже, розроблена математична модель дає змогу визначити наведену до точки контакту колеса і рейки жорсткість рейкової нитки, що дає можливість визначити вертикальні динамічні сили взаємодії колії та рухомого складу з урахуванням змін параметрів згинальної жорсткості рейкової нитки в зоні стику.

Потрібно зазначити, що вплив цих параметрів на сили взаємодії безперервно змінюється в процесі руху, нелінійно залежить як від жорсткості рейкових опор, так і від жорсткості рейок поза стиком і в зоні рейкового стику.

Список використаних джерел

1. Бесстыковой путь [Текст] / В. Г. Альбрехт, Е. М. Бромберг, Н. Б. Зверев [и др.]. – М.: Транспорт, 1982. – 206 с.
2. Даніленко, Е. І. Залізнична колія [Текст] : підруч. для вищих навчальних закладів / Е. І. Даніленко. – К. : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
3. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість [Текст] : ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рябкін. – К. : Транспорт України, 2006. – 168 с.
4. Бромберг, Е. М. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / Е. М. Бромберг, М. Ф. Вериго, В. Н. Данилов; под ред. М. А. Фишмана. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – 280 с.

5. A mathematical model of the rail track presented as a bar on elastic and dissipative supports under the influence of moving loads [Text] / A. Darenkiy, V. Vitolberg, D. Fast, A. Klymenko, Yar. Leibuk // МАТЕС Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – 116 p.
6. Шахуняц, Г. М. Железнодорожный путь [Текст]: монография / Г. М. Шахуняц. – М.: Транспорт, 1987. – 497 с.
7. Railway construction [Text] / Sz. Fisher, B. Eller, Z. Kada, A. Németh // Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 2015. – 334 p.
7. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 589 с.
8. Белых, К. Д. О нагрузках от колес при расчете железнодорожного пути [Текст] / К. Д. Белых, М. К. Уманов, Г. Н. Малышко // Металлургическая промышленность. – 1976. – №5 – С. 78-79.
9. Даренський, О. М. Аналіз розвитку теорій розрахунків залізничних колій [Текст] / О. М. Даренський, Е. А. Беліков // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 154. – С. 149-155.
10. Нисиров, Н. С. Исследования сил взаимодействия рельсовых нитей и подрельсовых шпальных оснований [Текст] / Н. С. Нисиров // Труды ЛИИЖТ. – Л.: Транспорт, 1977. – № 416. – С. 26-35.
11. Климов, В. И. Исследование влияния нелинейных характеристик подрельсового основания пути [Текст] / В. И. Климов, В. В. Рыбкин // Труды ДИИТа. – Днепропетровск: ДИИТ, 1987. – №2 44/32. – С. 72-84.
12. Даренський, О. Н. Теоретичні та експериментальні дослідження роботи залізничних колій промислового транспорту [Текст] : монографія / О. М. Даренський. – Харків : УкрДАЗТ, 2011. – 204 с.
13. Клименко, Л. В. Расчет пути с учетом неравноупругости подрельсового основания [Текст] / Л. В. Клименко // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – №6. – С. 34-35.
14. Даренський, О. М. Визначення приведеної вертикальної жорсткості рейкової нитки при використанні розрахункової схеми як балки на пружних опорах з випадковими характеристиками [Текст] / О. М. Даренський, Н. В. Бугаєць, В. Г. Вітольберг // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 115. – С. 151-162.
15. Чихладзе, Е. Д. Будівельна механіка [Текст]: підруч. для студентів вищих навчальних закладів / Е. Д. Чихладзе. – Харків : УкрДАЗТ, 2002. – 305 с.

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

Бугаєць Наталія Володимирівна, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-59. E-mail: natalia.bugaec@gmail.com.

Клименко Андрій Володимирович, канд. техн. наук, кафедра колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-60. E-mail: klymenko@kart.edu.ua.

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

Natalia Bugaets, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Track and Track Facilities Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-59. E-mail: natalia.bugaec@gmail.com.

Andrii Klymenko, PhD. Sc. Department of Track and Track Facilities Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-60. E-mail: klymenko@kart.edu.ua.

Стаття прийнята 26.12.2017 р.

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

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

Випуск 174

«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 Янченко Л. В.

Редактори Еткало О. О., Решетилова В. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 21.12.2017 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн.друк. арк. 9,25. Тираж 105. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.