



**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 161*



**Харків 2016**

## УДК 656.2(062)

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

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

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

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

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

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

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

## ISSN 1994-7852

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 4 від 24 травня 2016 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

Альошинський Є.С., д.т.н., професор,  
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  
Вагуля Г.Л., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Вовк Р.В., д.фіз.-мат.н., професор, УкрДУЗТ  
Воронін С.В., д.т.н., професор, 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

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  
Панченко С.В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Приходько С.І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Плугін А.А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Тартаковський Е.Д., д.т.н., професор,  
УкрДУЗТ  
Тимофєєва Л.А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Фалендиш А.П., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Щербак Я.В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

## ЗМІСТ

<i>Ломотько Д. В., Ярмач Г. М.</i> Удосконалення переробки вантажів залізничним транспортом в умовах системи транспортно-експедиційного обслуговування	5
<i>Примаченко Г. О., Аскеров З. А.</i> Аналіз технології роботи високошвидкісного залізничного транспорту	13
<i>Ломотько Д.В., Даценко Г.Г.</i> Аналіз рівня сервісу в умовах транспортно-пересадочних вузлів на високошвидкісних залізничних магістралях	25
<i>Ватуля Г. Л., Кітов Ю. П., Вєревічева М. А., Сінчук С. Д.</i> Деякі особливості задачі оптимізації шпренгельних балок	36
<i>Прогонний О. М., Зінченко О. Є., Сапова Д. В., Волошин В. В., Болдирєва Ж. А.</i> Аналіз сучасного стану математичного моделювання вихідного струму каналу передачі сигналів системи АЛСН	48
<i>Малішевська А. С.</i> Експериментальне визначення характеристик жорсткості підрейкових прокладок для проміжних рейкових скріплень типу «МЕТРО»	55
<i>Грицук І. В., Вєрбовський В. С.</i> Тепловий акумулятор фазового переходу як засіб підвищення ефективності передпускової і післяпускової теплової підготовки двигуна в умовах низьких температур	61
<i>Огар О. М., Асєєв М. А., Іваненко О. А.</i> Аналіз роботи підсистем регулювання швидкості скочування відцепів в автоматизованих системах управління сортувальними станціями	70
<i>Вінніченко В. І., Віценко Н. Ю., Рязанова О. М.</i> Теоретичне визначення витрат енергії на отримання клінкерних мінералів у доломітовому клінкері	76
<i>Гибаленко А. Н.</i> Мониторинг корозійної небезпеки металоконструкцій на основі характеристики втрати якості	83
<i>Мозговий А. О.</i> Імовірнісна оцінка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву і спливання на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду	90
<i>Шмуклер В. С., Стоянов Є. Г., Резник П. А., Набока А. В.</i> Робота опертої по контуру чарунки перекриття, що складається зі збірних залізобетонних балкових плит	101
<i>Фомін С. Л., Кравченко О. М.</i> Чисельне моделювання напружено-деформованого стану фундаментів коксових батарей	112
<i>Сироменко А. Н., Сєдышев Е. С.</i> Расчетная оценка трещинообразования от усадки бетона в ребрах монолитных железобетонных перекрытий	123
<i>Ягун Е. В.</i> Моделирование несимметрической системы электроснабжения с использованием оптимизации для определения параметров симметрирующего устройства	130

<i>Куценко М. Ю., Дудін О. А., Рибін А. В., Сініцина О. О., Лобода О. В.</i> Аналіз досліджень, присвячених реконструкції проміжних роздільних пунктів при введенні швидкісного руху	139
<i>Фомин С. Л., Плахотникова И. А., Парафенко А. А.</i> Расчет огнестойкости железобетонных плит перекрытия по уточненным и упрощенным методам	145
<i>Золотов С. М., Фирсов П. М., Клиценко К. А.</i> Реологические исследования и определение адсорбции модифицированных наполнителей метилметакрилата	157

УДК 656.2:339.13

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕРОБКИ ВАНТАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ В УМОВАХ СИСТЕМИ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИЦІЙНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ**

Д-р техн. наук Д. В. Ломотько, магістр Г. М. Ярмак

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ ГРУЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ В УСЛОВИЯХ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Д-р техн. наук Д. В. Ломотько, магістр Г. Н. Ярмак

**IMPROVING THE PROCESSING OF CARGO BY RAIL IN THE SYSTEM FORWARDING SERVICE**

Doct. of techn. sciences, professor D. V. Lomotko, master G. N. Yarmak

*Розглянуто питання формування ефективної технології переробки вантажів при взаємодії станцій та підприємств. Запропоновано підхід до формування гнучкої інформаційно-керуючої системи за критерієм отримання ефекту при застосуванні логістичної технології «door-to-door» із використанням автотранспорту для перевезення вантажу. Ефективність пропускання та переробки вантажу забезпечується відповідними задачами та структурою інформаційно-керуючої системи на основі логістичних підходів.*

**Ключові слова:** залізниця, транспортно-експедиційне обслуговування, вантаж, логістична технологія, інформаційно-керуюча система.

*Рассмотрены вопросы формирования эффективной технологии переработки грузов при взаимодействии станций и предприятий. Предложен подход к формированию гибкой информационно-управляющей системы по критерию получения эффекта при применении логистической технологии «door-to-door» с использованием автотранспорта для доставки груза. Эффективность пропуска и переработки груза обеспечивается соответствующими задачами и структурой информационно-управляющей системы на основе логистических подходов.*

**Ключевые слова:** железная дорога, транспортно-экспедиционное обслуживание, груз, логистическая технология, информационно-управляющая система.

*The question of the formation of effective technology of cargo vo interaction stations and businesses. Improved technology must take into account the time of delivery, convenience and timeliness of all transactions during transport in terms of reducing the cost of delivery. We consider logistics optimization problem of delivery of cargo to customers by the criterion of a minimum of unproductive flights. For real terms proposed railway junction structure improved exchange of information between operational staff, providing more quality information sharing by employees and operational mutually connects the information flow cargo fronts with the process of cargo operations. The approach to the formation of a flexible information management system for the criteria for the application of the effect of logistics technology «door-to-door» with the use of vehicles for transport of cargo. Efficiency admission and processing of goods provided by the respective tasks and structure of information and control systems based logistics approach. A generalized approach to calculating the economic feasibility of implementing information*

*management system of the delivery of cargo primarily takes into account all the costs of organizing information channels that will provide the required level of performance of analytical operations.*

**Keywords:** *railway, freight forwarding services, freight, logistics technology, information management system.*

**Вступ.** В умовах вітчизняного транспортного ринку все більш важливе значення для залізниць має удосконалення технології переробки та перевезення вантажопотоків із заданим рівнем якості. Крім того, успішність та конкурентоспроможність роботи залізниць у транспортній системі країни залежить від технічної, технологічної, організаційної та інформаційної забезпеченості технології, зокрема при роботі на під'їзних коліях підприємств із масовими вантажами. Аналіз елементів обігу вантажного вагона показав, що близько 42 % припадає на станції з вантажними операціями, тобто технологія роботи вантажних станцій істотно впливає на процес функціонування промислових підприємств. Це вимагає від залізничного транспорту впровадження комплексних підходів з удосконалення технології роботи на вантажних районах і на під'їзних коліях підприємств у першу чергу при застосуванні логістичних принципів.

**Постановка проблеми.** Як свідчить вітчизняний та закордонний досвід, удосконалення технології взаємодії підприємств-відправників вантажів із магістральним транспортом можна досягти за рахунок удосконалення технологічних процесів перевезень та підвищення якості транспортно-експедиційного обслуговування на вантажних районах станцій або підприємствами промислового залізничного транспорту.

У той же час через запізнення вантажів, несвоєчасне подавання порожніх вагонів, відсутність гнучкої інформаційної системи та системи електронного документообігу виробничі потужності, прирейкові склади та устаткування під'їзних колій підприємств використовуються із великою часткою непродуктивних простоїв. Тому саме зараз

перед залізницями постає актуальне завдання формування гнучкої технології вантажної роботи з урахуванням логістичних принципів. Удосконалена технологія має враховувати строк доставки вантажу, зручність та своєчасність виконання усіх операцій у процесі транспортування в умовах зменшення витрат на доставку.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Для залізничних станцій у процесі взаємодії має бути врахована системна інтеграція. Ця система складається з великої кількості окремих підрозділів та підсистем, які сумісно виконують технологічні операції із заданою якістю [1]. При переробці масових вантажів залізниця виконує додаткові технологічні операції, які безпосередньо не пов'язані із перевезенням, але підвищують рівень привабливості перевізника. Дослідження у цьому напрямку широко висвітлено у наукових працях як в Україні [2,3], так і за кордоном [5]. Підвищення конкурентоспроможності залізниць та впровадження нових форм організації перевізного процесу багато в чому пов'язано із реалізацією ефективної інформаційної технології взаємодії [3, 7]. Важливим є врахування екологічної складової при формуванні транспортно-логістичних систем з урахуванням внутрішньої узагальненої економічної ефективності та відповідної якості транспортно-експедиційних послуг [6]. Таким чином, виникли задачі, що пов'язані із реалізацією логістичних принципів у процес перевезень і з удосконалення технології вантажної і комерційної роботи. З урахуванням цього комерційна і вантажна діяльність залізниць має бути зорієнтованою на наявність наскрізного обслуговування в рамках гнучких технологічних рішень [9].

**Формулювання мети та постановка завдання.** Таким чином, постає необхідність у вирішенні задачі формування ефективної системи транспортно-експедиційного та логістичного обслуговування як системи стійкого зв'язку між господарчими суб'єктами та перевізником. При цьому важливим фактором є те, що ринок вантажних залізничних перевезень визначається різними організаційними структурами, технологію роботи яких має бути засновано на розвитку відповідних інформаційно-керуючих систем.

**Удосконалення переробки вантажів залізничним транспортом в умовах системи транспортно-експедиційного обслуговування.** Зважаючи на особливості вітчизняного транспортного ринку, вантажовласники оцінюють якість роботи залізничного транспорту із масовими вантажами за критерієм доставки «точно в строк». Важливим при цьому постає питання формування наскрізного технологічного процесу взаємодії перевізника із підприємством з виконанням умови мінімуму загальних витрат. Створення таких варіантів доставки поєднує організаційні питання взаємодії із методами раціоналізації технічного оснащення і кількості технічних засобів. Як технологічне обмеження мають виступати час перебування вагонів та вантажів на станції, умови забезпечення скорочення обігу вантажного вагона та раціональна кількість вантажу, що перебуває на шляху прямування.

Аналіз особливостей технологічних варіантів транспортно-експедиційного обслуговування вантажів показує, що на цей процес істотний вплив здійснюють певні особливості у технології виконання вантажних операцій із вантажами, що підсилює необхідність безупинного процесу пошуку та постачання порожніх вагонів. Можливі коливання обсягів перевезень вантажів, що спостерігаються останнім часом, призводять до необхідності комплексного вирішення задачі з

оптимізації накопичувальної ємності складів для вантажу, місткості вантажних фронтів та розмірів подачі вагонів і партії вантажу при подаванні і при забиранні або при завезенні та вивезенні вантажів автотранспортом.

В умовах ринкової економіки якість управління роботою станції залежить від того, наскільки раціонально прийнято технічне улаштування і кількість працівників для виконання існуючого обсягу переробки. Інакше неминучі простої або технічних засобів і працівників, або вагонів в очікуванні обслуговування, що збільшує експлуатаційні витрати. Вибір оптимального варіанта управління, який забезпечував би максимальну експлуатаційну надійність функціонування станції – відповідний режим роботи, відсутність або мінімум міжопераційних простоїв вагонів, – це задача оперативного керівництва роботою станції. Для однієї із станцій Київського залізничного вузла проведено аналіз фактичного часу перебування вагонів. Встановлено, що він не тільки залежить від технології її роботи та технічного оснащення, але й від ступеня узгодженості дій між структурними підрозділами на станції та у вантажовласника. На основі даних звітів за 2014-2015 рік оцінено розподіл часу перебування вагонів та контейнерів на станції, який наведено на рис. 1.

Для усунення неузгодженості при роботі з матеріальними та інформаційними потоками та забезпечення взаємодії між різними підсистемами станції запропоновано сучасні рішення, що спрямовані на підвищення ефективності функціонування підприємств і вимагають формування єдиної методології створення систем підтримки прийняття рішень. Інформаційно-керуюча система логістичного ланцюга має бути частиною інформаційного середовища підприємства, його під'їзної колії (за наявності) та вантажної станції. За рахунок цього буде здійснено підвищення ефективності узгодженої роботи на

станціях та підприємствах як підсистемах логістичного ланцюга доставки вантажів. Для реальних умов однієї із станцій Київського залізничного вузла запропоновано удосконалену структуру обміну інформацією між оперативними працівниками (рис. 2), що забезпечує більш якісний обмін інформацією між відповідними оперативними працівниками

та взаємно пов'язує інформаційні потоки вантажних фронтів з процесом виконання вантажних операцій. Отримана інформація передається на АРМ оперативних працівників станції з вантажними операціями: завідуючого вантажним районом, маневрового диспетчера, чергового по станції, диспетчера дирекції перевезень.

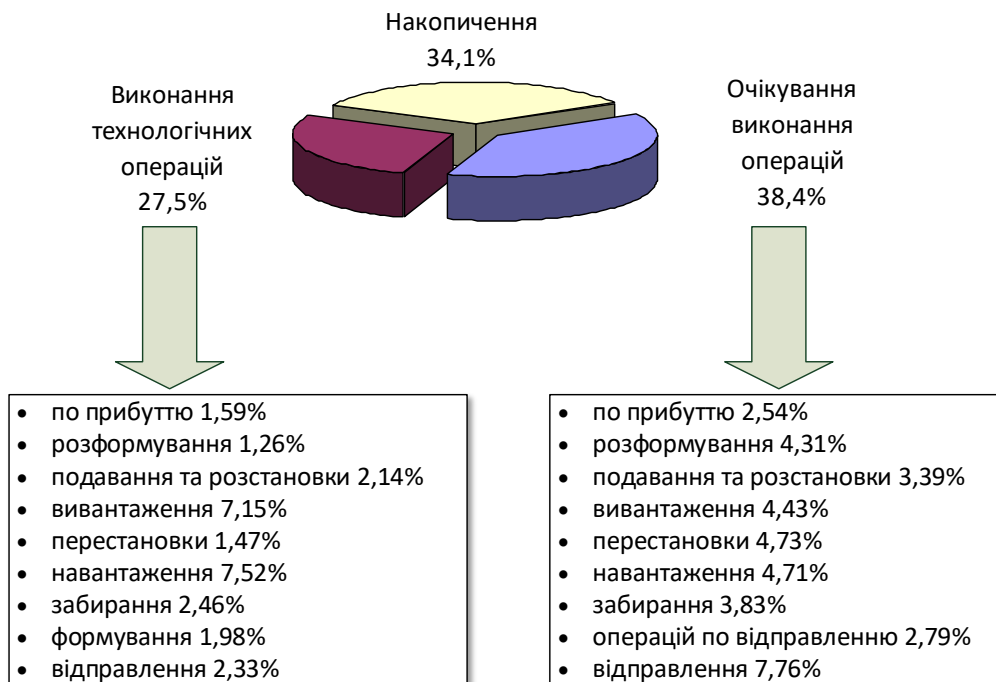


Рис. 1. Розподіл часу перебування вагонів і контейнерів на станції під основними технологічними операціями та в їх очікуванні.

Удосконалення процесів прогнозування та планування обсягів навантаження, вивантаження та пропускання вантажу до станції призначення, обсяги завезення – вивезення автотранспортом можна досягти шляхом своєчасної передачі по каналах єдиної автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями Укрзалізниці інформації про узгодження параметрів перевезення. При цьому має бути врахована необхідність отримання первинної інформації із АРМ ТВК та АСУ Месплан у районі планування навантаження в район вивантаження. Принципову структуру

задач для реалізації інформаційно-керуючої системи управління доставкою вантажів за логістичною технологією подано на рис. 3.

Узагальнений підхід до розрахунку економічної доцільності впровадження інформаційно-керуючої системи управління доставкою вантажів, у першу чергу, має враховувати витрати на організацію інформаційних каналів, що будуть забезпечувати необхідний рівень виконання аналітичних операцій [8]. Поряд із цим у подальшому необхідно визначити економію від раціонального використання локомотивного, вагонного парків та необхідної кількості автотранспорту для обслуговування заданих обсягів вантажів.



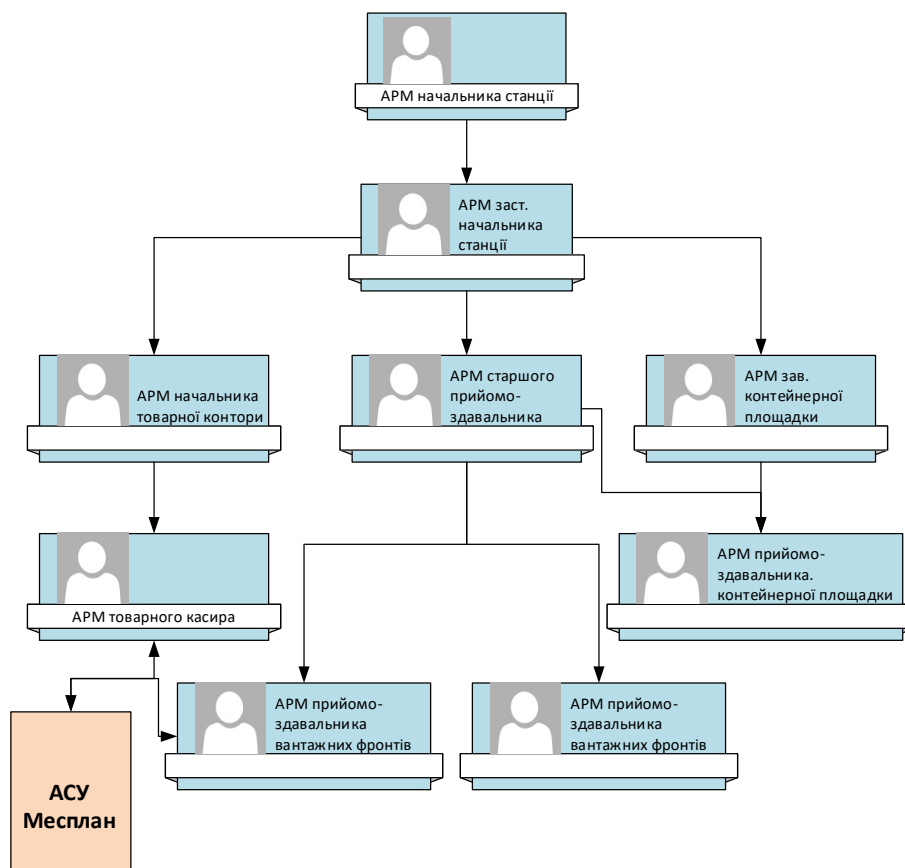


Рис. 2. Схема обміну інформацією між оперативними працівниками станції

Частиною транспортно-експедиційного обслуговування для умов вантажної станції є оптимізація доставки вантажів по клієнтах. За рахунок цього досягається реалізація логістичної технології «door-to-door». Логістичні задачі, такі як оптимізація доставки вантажів по клієнтах, вирішити найпростішими методами або на основі досвіду роботи неможливо. Це пов'язано з тим, що виникає дуже велика кількість можливих варіантів, які можна розглянути в межах інформаційно-керуючої системи управління доставкою вантажів.

Класичними варіантами організації руху автомобіля можуть бути: маятниковий маршрут зі зворотним порожнім пробігом або розвізний маршрут при перевезенні дрібнопартійних вантажів підприємствам. На практиці при плануванні роботи автомобілів по маятникових маршрутах зі

зворотним порожнім пробігом керуються лише одним правилом: останній пункт вивантаження автомобілів має бути якомога ближче до автотранспортного підприємства. Вважається, що при дотриманні цієї рекомендації буде забезпечений мінімум пробігу без вантажу. Аналіз задачі довів, що таке рішення не завжди є раціональним.

Зокрема, розглянуто випадок, коли для однієї із станцій Київського залізничного вузла (контейнерний термінал П) необхідно доставити продукцію підприємствам А та В, після цього автомобіль прямує до АТП (пункт Б). Умови та схема розміщення споживачів наведено на рис. 4. Завдання в складі розглянутої вище інформаційно-керуючої системи має дати рішення у вигляді такого маршруту руху автомобіля, що забезпечує мінімум порожнього пробігу.

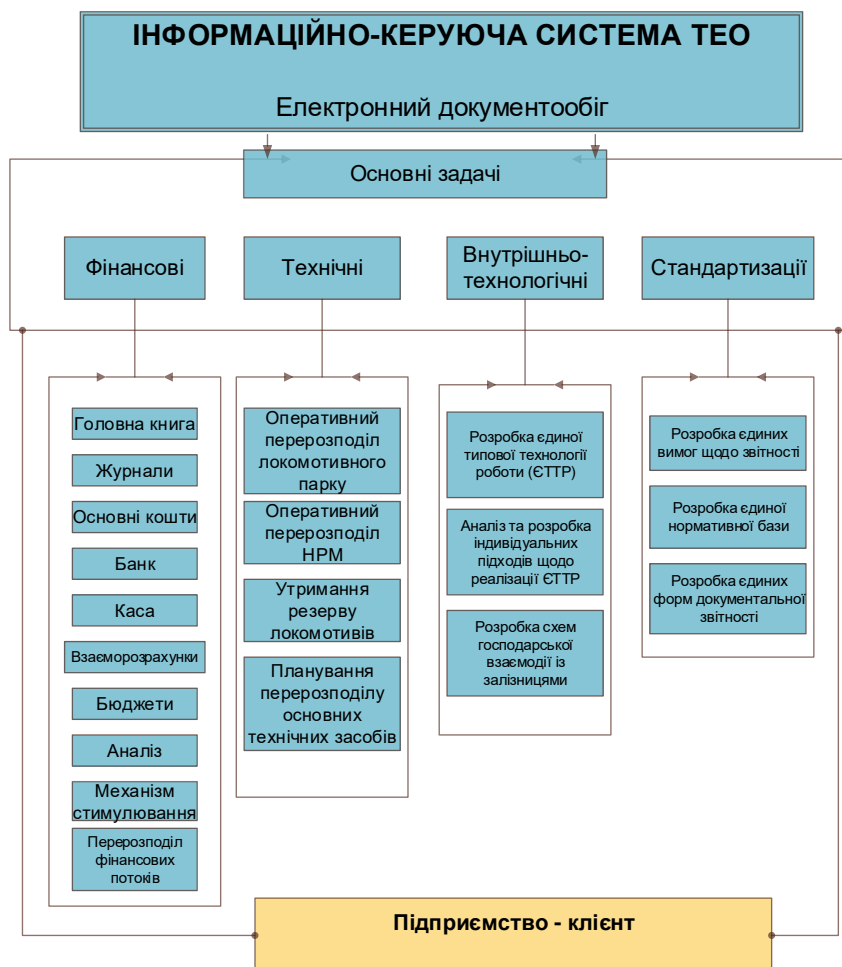


Рис. 3. Принципова структура задач для реалізації інформаційно-керуючої системи управління доставкою вантажів за логістичною технологією

При вирішенні цієї задачі варіанти розглядаються шляхом розрахунку та порівняння коефіцієнта використання пробігу автомобіля  $\beta$ , що визначається формулою:

$$\beta = \frac{l_{зав}}{l_{заг}}, \quad (1)$$

де  $l_{зав}$  - завантажений пробіг автомобіля, км;

$l_{заг}$  - загальний пробіг автомобіля, км.

У загальному випадку задача складання раціональних маршрутів, що забезпечують мінімальний порожній пробіг

автотранспортних засобів, зводиться до такої задачі лінійного програмування:

$$L = \mathop{\text{arg min}}_X \left( \sum_{i=1}^n (l_0^{Fi} - l_{пбi}) X_i \right), \quad (2)$$

при обмеженнях

$$0 < X_j < Q_j \text{ та } \sum_{j=1}^n X_j = N, \quad (3)$$

де  $L$  - порожній пробіг, км;

$l_0^{Bi}$  - відстань від пункту призначення  $B_j$  до АТП (порожній пробіг), км;

$l_{PB_j}$  - відстань від станції П до Б<sub>і</sub> (завантажений пробіг), км;  
 $j$  - номер (індекс) споживача ( $J=1, 2, \dots, n$ );  
 $X_j$  - кількість автомобілів, що працюють на маршрутах із останнім пунктом вивантаження Б<sub>і</sub>;

$N$  - кількість автомобілів, що працюють на усіх маршрутах;  
 $Q_j$  - обсяг перевезення (в поїздках автомобіля).

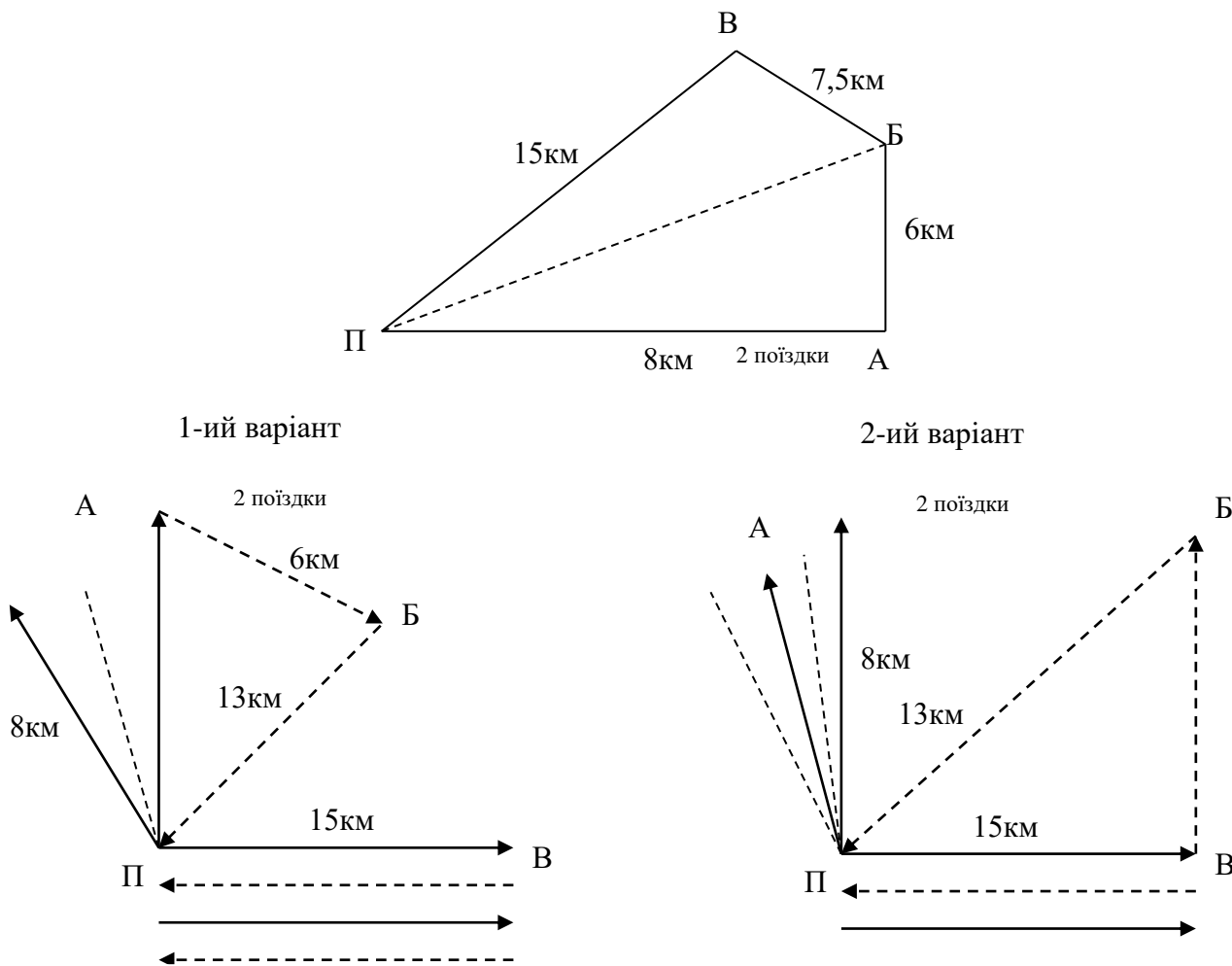


Рис. 4. Схема розміщення умовних підприємств

При вирішенні задачі встановлено, що найкраще рішення буде при такій системі організації маршрутів, коли максимальна кількість автомобілів закінчує роботу в пунктах призначення з мінімальною різницею  $l_0^{E_u} - l_{PB_j}$ , тобто 2-й варіант на рис. 4. Вирішену задачу складання раціональних маршрутів, що забезпечують

мінімальний порожній пробіг транспортних засобів, запропоновано використати в складі розглянутої вище інформаційно-керуючої системи (див. рис. 3). В реальних умовах економію від скорочення простою вагонів необхідно розраховувати при умові врахування вартості вантажу, таким чином:

$$E = 365 \cdot \left( c_{ваг} + \frac{Ц_{вант} P_{ст}}{1 + \frac{F}{360 \cdot 100}} \right) \cdot n_v \cdot \Delta t_{місц}, \quad (4)$$

де  $c_{ваг}$  – вартість експлуатаційної ваг.год вагона, грн;

$Ц_{вант}$  – індикативна вартість 1 т вантажу, грн;

$P_{ст}$  – статичне навантаження вагона, т/ваг, кількість яких  $n_v$ ;

$F$  – облікова банківська ставка, %;

$\Delta t_{місц}$  – середнє скорочення простою місцевого вагона на станції за рахунок застосування запропонованої ІКС, год.

Впровадження запропонованої інформаційно-керуючої системи є перспективною задачею, тому при розрахунку економічної доцільності слід враховувати вартість розробки, впровадження і підтримки програмного забезпечення. Визначення точної вартості в даних умовах неможливе з ряду причин:

- безпосередньо ціну програмного продукту встановлює виконавець робіт;
- відсутність загальної затвердженої методики оцінки програмного продукту;

- можливість зміни набору прикладних задач, що будуть вирішуватися на базі АРМ.

З урахуванням орієнтовної вартості життєвого циклу програмного забезпечення встановлено, що термін окупності системи складає близько двох років.

**Висновки.** Таким чином, розроблений методологічний підхід щодо створення технології та організаційної структури інформаційно-керуючої системи надасть можливість удосконалити управління потоками вантажів у взаємодії із магістральним залізничним і при застосуванні логістичної технології «door-to-door» із використанням автотранспорту. Запропоновані підходи мають допомогти вирішити основні проблеми, пов'язані з безперешкодним проходженням вантажів через промислові транспортні вузли шляхом створення логістичної системи керування потоками вантажів.

### Список використаних джерел

1. Eva Nedeliaková, Jana Sekulová, Ivan Nedeliak, Martin Loch, Methodics of Identification Level of Service Quality in Railway Transport, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 110, 24 January 2014, P. 320-329.
2. Пасічник, В.І. Економіко-організаційні аспекти управління експлуатаційною діяльністю залізниць [Текст] / В.І.Пасічник // Заліз. трансп. України. – 2005. – № 2. – С. 78-80.
3. Сушарин, Є.В. Формування логістичної моделі обслуговування масових вантажів залізничним транспортом незагального користування [Текст] / Є.В. Сушарин, Т.В. Бутько, Д.В. Ломотько // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 1, 2.
4. Ломотько Д. В., Ковальов А. О., Ковальова О. В. Formation of fuzzy support system for decision-making on merchantability of rolling stock in its allocation [Електронний ресурс] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Т. 6. – №.3(78). – С. 11-17. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54496>.
5. Congli Hao, Yixiang Yue, Optimization on Combination of Transport Routes and Modes on Dynamic Programming for a Container Multimodal Transport System [Електронний ресурс] // Procedia Engineering, Volume 137, 2016, P. 382-390. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.272>.

6. Fedele Iannone, The private and social cost efficiency of port hinterland container distribution through a regional logistics system [Електронний ресурс] // Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 46, Issue 9, November 2012, P. 1424-1448. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2012.05.019>.

7. Панкратов, В. І. Удосконалення технології роботи залізничного транспорту незагального користування на базі інформаційно-керуючої системи [Текст] / В.І. Панкратов // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – Вип. 85. – С. 12-24.

8. Ломотько, Д. В. Формування транспортного процесу залізниць України на базі логістичних принципів [Текст]: дис... д-ра техн. наук / Д.В. Ломотько. – Харків, 2008. – 402 с.

9. Левківський, О.П. Вибір стратегії формування транспортного процесу різних видів транспорту на базі логістичних принципів.[Текст] / О.П. Левківський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – №4. – С. 19-20.

---

Ломотько Денис Вікторович, д-р техн. наук, професор, кафедра транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-55.

E-mail: [den@kart.edu.ua](mailto:den@kart.edu.ua) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

Ярмак Галина Миколаївна, магістр, кафедра транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-55.

Lomotko Denis, Doct. of techn. sciences, Professor, Department of Transport and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-55. E-mail: [den@kart.edu.ua](mailto:den@kart.edu.ua) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925>

Yarmak Galina, master Department of Transport and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-55.

Стаття поступила 07.04.2016 р.

УДК 656.222.1

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Канд. техн. наук Г. О. Примаченко, магістрант З. А. Аскеров

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Канд. техн. наук А. А. Примаченко, магистрант З. А. Аскеров

## ANALYSIS OF THE TECHNOLOGY WORK HIGH-SPEED RAIL

Cand. of techn. sciences G. Prymachenko, master student Z. Askerov

*Розглянуто вирішення актуальної проблеми впровадження швидкісного пасажирського руху на залізницях України з метою підвищення якості послуг, що надаються, і ефективності роботи транспортного комплексу. Для цього наведено приклади розвитку та впровадження швидкісного та високошвидкісного руху на залізницях світу. Визначено сутність, доцільність, необхідність проведення модернізації та побудови спеціалізованих залізничних ліній в Україні.*

**Ключові слова:** високошвидкісна магістраль, реконструкція, швидкісний рух, залізнична мережа, пасажиропотік, рухомий склад.

*Рассмотрено решение актуальной проблемы внедрения скоростного пассажирского движения на железных дорогах Украины с целью повышения качества услуг и эффективности работы транспортного комплекса. Для этого приведены примеры развития и внедрения скоростного и высокоскоростного движения на железных дорогах мира. Определена сущность, целесообразность, необходимость проведения модернизации и построения специализированных железнодорожных линий в Украине.*

**Ключевые слова:** *высокоскоростная магистраль, реконструкция, скоростное движение, железнодорожная сеть, пассажиропоток, подвижной состав.*

*We consider solving actual problem of introduction high-speed passenger traffic on the railways of Ukraine to improve the quality of services provided and the efficiency of the transport sector. There are examples of the development and implementation of high-speed and high-speed railways in the world. We essenced appropriateness necessity of modernization and construction of special railway lines in Ukraine. It presents the necessary conditions, aimed at implementing the program of implementation of high-speed passenger traffic. Built simulation model of carrying railway station and the nearby ferrying at different speeds with the use of Petri nets. The model allows identify forward the results to reduce the time of passenger trains on selected portions of the motion before the decision to implement the reconstruction of high-speed movement. The use of models will not only improve the quality of services for passengers, but also to ensure the competitiveness of the transport market of Ukraine.*

**Keywords:** *high-speed railway, reconstruction, movement speed railway network, passenger, rolling stock.*

**Вступ.** На протязі останніх десятиліть залізничний транспорт суттєво потіснив автомобільний та став партнером авіаційного транспорту у сфері внутрішньодержавних та міжнародних залізничних перевезень. Поїздки швидкісними та високошвидкісними лініями заміняють використання літаків на відстані 500 – 1000 км завдяки очевидним перевагам залізничного транспорту: безпека, комфорт, надійність, можливість для пасажира прибуття майже у центр міста, зменшений негативний вплив на навколишнє середовище за рахунок використання електроенергії.

Підвищення швидкості руху транспортних засобів має велике значення для суспільства. Воно змінює концепцію життя населення. Використання сучасних швидкісних поїздів зробило нормою мати роботу на відстані 100 км від місця проживання, використання часу перебування у вагоні для роботи та самовдосконалення. Швидкість руху транспортних засобів поряд з глобальною

інформатизацією є найбільш вагомими показниками нинішнього етапу науково-технічного прогресу [1, 2].

Проблема кардинального підвищення швидкості руху не може бути вирішена без створення спеціалізованих високошвидкісних магістралей (ВШМ) на залізницях України. При цьому слід звернути увагу, що держава отримує багато позитивних змін від реалізації такого проекту. Додаткові фактори розвитку швидкісного і високошвидкісного руху часто не визначають прямої економічної вигоди для держави, однак відіграють важливу соціальну роль.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Технологія роботи високошвидкісного залізничного транспорту досліджується у багатьох роботах закордонних та вітчизняних вчених [3-6]. Досліджувалися перспективи розвитку швидкісного руху у сполученнях Європа – Азія на території України [7], наведені основні недоліки та переваги у порівнянні з існуючою системою залізничних

сполучень. Питання розкрито частково оглядом наявних досліджень.

Проводилось дослідження питання реконструкції наявної залізничної мережі з метою впровадження високошвидкісного руху [8]. Порівнювалися варіанти будівництва нових ліній для швидкісного залізничного руху та реконструкції існуючих. Також наведені основні недоліки та переваги кожного з варіантів.

Процес організації високошвидкісного руху було докладно розкрито у [9]. Розглянуто основні напрямки реформування та державного регулювання розвитку залізничного транспорту України [10], у тому числі при впровадженні високошвидкісного руху.

Але питання аналізу технології роботи високошвидкісного залізничного транспорту не було повно розглянуто.

**Визначення мети та задач дослідження.** Мета статті – розкрити питання технології роботи високошвидкісного пасажирського залізничного транспорту в транспортному комплексі України.

Поставлена мета визначила основні задачі дослідження:

- аналіз обсягів та структури пасажирських перевезень у внутрішньому сполученні;

- аналіз вітчизняних і закордонних теоретичних розробок і практичного досвіду технології пасажирських перевезень для визначення ступеня завантаження основних пристроїв залізничних станцій при обслуговуванні пасажиропотоку.

**Основна частина дослідження.** Позитивними аспектами розвитку високошвидкісного руху є [11]: підвищення ділової активності та мобільності населення, в тому числі розвиток торгівлі, туризму, всієї сфери обслуговування, збільшення транспортної доступності регіонів країни; додаткові можливості залучення великих інвестицій, в тому числі й іноземних, отримання відповідних податкових відрахувань до бюджетів; прискорення науково-технічного прогресу

на залізничному транспорті, в транспортному машинобудуванні і транспортному будівництві; підвищення конкурентоспроможності країни на світовому ринку транспортних послуг, а також експортного потенціалу вітчизняної промисловості; створення нових робочих місць, міграція населення в регіони будівництва й експлуатації високошвидкісних ліній; економія паливно-енергетичних і матеріальних ресурсів після початку експлуатації ВШМ; підвищення рівня культури та освіченості жителів регіонів за рахунок підвищення можливості спілкування; зміцнення соціально-територіальної цілісності держави, інтеграція регіонів тяжіння.

При визначеній ефективності того чи іншого виду транспорту перш за все враховують витрати часу на поїздку, що напряму залежать від швидкості руху.

Виходячи з цього повітряний транспорт слід було б вважати найбільш перспективним видом високошвидкісного транспорту. Однак внаслідок багатогранності умов, в яких виконуються пасажирські перевезення, а також неоднакової собівартості перевезень пасажирів різними видами транспорту такі висновки є неоднозначними. Незважаючи на те, що швидкісні можливості залізничного транспорту нижчі, ніж у повітряного, при визначених умовах високошвидкісні пасажирські поїзди виявляються більш зручними та рентабельнішими для пасажирів, ніж літаки.

Переваги високошвидкісного руху пасажирських поїздів яскраво проявляються при визначеній дальності перевезень пасажирів. При дальності перевезень до 650-750 км затрати часу для пасажирів при використанні ВШМ будуть меншими, ніж на повітряному транспорті. Перевезення пасажирів на такі відстані слід визнати оптимальними саме залізничним транспортом.

У даний час високошвидкісний залізничний транспорт при організації

масових перевезень пасажирів впевнено посідає транспортну нішу в діапазоні відстаней 400-800 км, забезпечуючи найменший сумарний час у дорозі, тобто найбільшу загальну швидкість поїздки при найвищих показниках безпеки, комфортабельності та економічності. За даними Міжнародного Союзу Залізниць (МСЗ), при часі в дорозі по магістральній частині маршруту до 2,5 год більше 75 % пасажиропотоку припадає на ВШМ, при часі 3,5-4,0 год пасажиропотік розподіляється між поїздами і літаками, а при часі понад 4,5 год більш привабливим для пасажирів стають авіаперевезення.

Поняття «високошвидкісний залізничний транспорт» має відносний характер і може різнитися залежно від країни та історичного періоду застосування. Зокрема, ще на початку ХХ століття високошвидкісними називали поїзди, що рухалися зі швидкостями понад 160 км/год. В зв'язку з подальшим зростанням швидкостей руху поїздів дана планка поступово підвищувалася. На сьогодні ж високошвидкісним наземним транспортом вважається залізничний транспорт, що забезпечує рух швидкісних поїздів зі швидкістю понад 250 км/год. по спеціалізованих лініях, або зі швидкістю більше 200 км/год. по вже існуючим коліям. Але слід брати до уваги, що в залежності від регіону градація швидкостей дещо відрізняється.

Сучасний етап розвитку високошвидкісного залізничного транспорту характеризується тим, що у світовій спільноті стала використовуватись ще одна градація швидкостей. Якщо раніше практично однозначно виділялись поняття «високошвидкісні залізниці», «високошвидкісний поїзд» (в англійській літературі – high speed railways, high speed train), то тепер все частіше трапляються такі поняття, як надзвичайно або дуже високошвидкісна (в англійській літературі – extreme high speed, very high speed) залізниця або поїзд.

Відповідно до цього, у зарубіжній залізничній літературі, зокрема і в матеріалах МСЗ, виник розподіл ліній, призначених для високошвидкісного руху, на три категорії:

- швидкісні – для швидкостей руху 200-250 км/год (звичайні реконструйовані магістральні лінії);

- високошвидкісні – для швидкостей 250-300 км/год (спеціально побудовані високошвидкісні лінії);

- надзвичайно або надвисокошвидкісні – для швидкостей понад 300 км/год (спеціально побудовані надвисокошвидкісні лінії).

Аналогічно стали розділяти і поїзди. Декілька компаній, що випускають рухомий склад для ВШМ, уже створили або близькі до створення надвисокошвидкісних поїздів. Так, компанія Siemens (Німеччина) розробила поїзди-платформи Velaro, призначені для Іспанії та Китаю (конструкційна швидкість 350 км/год.); компанія Alstom (Франція) – поїзд AGV (360 км/год); компанія Sifang (Китай) – поїзд Zefiro 380 (380 км/год); компанія Talgo (Іспанія) – поїзд Avril (380 км/год), і компанія Hyundai Rotem (Республіка Корея) – поїзд HEMU-430 (430 км/год).

Для світової, в тому числі і для української залізничної теорії і практики така ситуація викликає необхідність корегування термінології для адекватного розуміння ситуації у світі з високошвидкісним рухом і власного стану в цій сфері. Оцінюючи сучасну ситуацію з організацією високошвидкісного руху в Україні, очевидно, що наша держава лише розпочинає рух у цьому напрямку.

Для України більш прийнятним буде застосовувати класифікацію швидкостей, зображену на рис. 1.

Для реалізації концепції високошвидкісного руху в Україні слід пройти довгий шлях модернізації технологій, створення відповідної інфраструктури, спеціальних ліній, систем сигналізації, централізації та блокування, освоєння спеціального рухомого складу.





Рис. 1. Схема класифікації залізниць за швидкостями руху

На сьогодні загальна довжина ВШМ у світі становить 17 тис. км, швидкісні поїзди курсують на полігоні сумарною довжиною приблизно 25 тис. км. Із графіка (рис. 2), який було надано в доповіді МСЗ на VIII конгресі, видно, що прискорення будівництва залізничних магістралей у світі відбулось після 2004 р., коли почалося втілення в життя будівництва ВШМ у Китаї і Туреччині, розширення будівництва ВШМ в Іспанії і ряді інших країн.

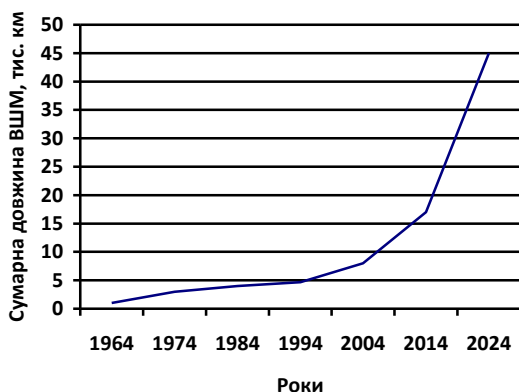


Рис. 2. Зростання протяжності ВШМ у світі (за даними МСЗ)

На даний момент протяжність високошвидкісних магістралей у Китаї більше 6 тис. км, в Японії – 2664 км, Іспанії – 2656 км, Франції – 2036 км, Німеччині – 1334 км, Італії – 923 км. При цьому найбільший пасажирообіг спостерігається на ВШМ Японії, Франції та Німеччини.

У порівнянні із західноєвропейськими, українські залізниці характеризуються значно більшими обсягами перевізної роботи, високим рівнем інтенсивності руху, значно більшою вагою поїздів та осьових навантажень рухомого складу. На сьогодні резерви технічних можливостей залізничного транспорту, його провізної спроможності практично вичерпані. Виходячи з цього, питання впровадження швидкісного руху досі залишається складною проблемою та потребує кардинально нових рішень, цілого комплексу специфічних підходів та інноваційної системи управління.

В Україні і досі існує змішана система експлуатації залізничних ліній, тобто інфраструктура використовується як для пасажирського, так і для вантажного руху. Це створює значні обмеження щодо подальшого підвищення швидкостей руху, застосування прогресивного рухомого складу, підвищення комфорту пасажирів. За умов негативного впливу вантажних поїздів на стан залізничного полотна потребуються значні витрати на утримання його в належному стані. Для вирішення цієї проблеми доцільно розділити пасажирський та вантажний рух.

Протягом останнього десятиліття на залізницях України було проведено значний обсяг робіт з модернізації колійного розвитку, пристроїв автоматики, телемеханіки та зв'язку, розширено полігон

обертання електропоїздів шляхом електрифікації ділянок, збільшено протяжність колії на залізобетонних шпалах, протяжність безстикової колії. Тобто було створено передумови для впровадження прискореного та швидкісного руху. Важливим поштовхом для створення мережі швидкісних перевезень стала реалізація проекту організації швидкісного транспортного забезпечення на час проведення чемпіонату Європи з футболу у 2012 році.

У 2004 році було розроблено та схвалено Кабінетом Міністрів України Концепцію державної цільової програми впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів на 2005-2015 рр. Згідно з цією Концепцією було реалізовано комплекс робіт у Київському вузлі, здійснено поетапну реконструкцію головних залізничних колій на напрямках Київ – Харків, Полтава – Донецьк, Київ – Львів. Для освоєння нового сегмента ринку – денних швидкісних перевезень – відповідно до Наказу Міністерства інфраструктури України від 22 лютого 2012 р. №116 було засновано Державне підприємство «Українська залізнична швидкісна компанія» (ДП «УЗШК»). Основною діяльністю ДП «УЗШК» є швидкісні пасажирські залізничні перевезення. Реалізація концепції дала змогу ввести в графік руху поїздів денні прискорені поїзди-експреси, скоротити час прямування між головними промисловими центрами України.

Адаптація рухомого складу до українських умов експлуатації, крім позитивних перетворень, все ж мала ряд труднощів. Зокрема було усунено невідповідності габаритів, пристосування до існуючої мережі електрифікації, а також досі потребує врегулювання питання невідповідності рухомого складу кліматичним умовам України [12]. Крім того, у лютому 2014 р. було виявлено тріщини в конструкції поїздів HYUNDAI, що поставило під загрозу життя пасажирів і

змусило керівництво ДП «УЗШК» призупинити їх експлуатацію. Проведено необхідні випробування та готується модернізація цього рухомого складу, зокрема заміна всіх балок у рамках гарантійного обслуговування корейською компанією-виробником.

У майбутньому планується продовження реалізації задумів щодо впровадження високошвидкісного пасажирського руху на теренах залізниць України з можливістю досягнення на перспективу швидкостей руху до 350 км/год.

У процесі модернізації існуючої технічної системи руху швидкісних поїздів вирішуються задачі розрахунку параметрів і дослідження процесів у цій системі. При проведенні багатоваріантних розрахунків реальну систему замінюють моделлю [13].

У широкому розумінні модель визначають як відображення найбільш значущих властивостей об'єкта. Тобто математична модель технічного об'єкта – це сукупність математичних об'єктів і співвідношень між ними, яка адекватно відображає властивості досліджуваного об'єкта. Тому для існуючих залізничних колій при впровадженні на них швидкісного руху, з метою визначення доцільності реконструкції, вирішено побудувати імітаційну математичну модель.

Доцільність використання методу моделювання в питанні організації швидкісного пасажирського руху поїздів обумовлена необхідністю залучення великої кількості часу та фінансових витрат на безпосереднє дослідження системи експериментальними методами.

Для вирішення питань оптимізації швидкісного руху, що розглядаються в даній роботі, найбільш доцільним є застосування апарата мереж Петрі. Це дасть змогу більш наочно подати систему організації швидкісного руху та отримати чітку інформацію щодо можливих варіантів функціонування системи. Для вирішення задачі встановлення, опису і наступного

відтворення причинно-наслідкових зв'язків і взаємодії між елементами комплексу застосовують системи рівнобіжної обробки інформації і системи паралельно діючих об'єктів [14].

Мережі Петрі являють собою графічний і математичний засіб моделювання, що застосовується до різноманітних систем, у тому числі і до транспортних. Як графічний засіб мережі Петрі можуть використовуватися для наочного зображення системи, що моделюється, подібно до блок-схем, структурних схем і мережних графіків. Як математичний засіб аналітичне подання мережі Петрі дає змогу скласти рівняння стану, алгебраїчні рівняння й інші математичні співвідношення, які описують динаміку систем. На основі інформації, отриманої в результаті аналізу, можливе отримання оцінки не тільки модельованої системи, але і її структури та поведіння. Це перспективний інструмент опису і дослідження мультипрограмних, асинхронних, розподілених, паралельних, недетермінованих і (або) стохастичних систем обробки інформації [15].

Мережа Петрі являє собою деякий різновид орієнтованого графа із заданим початковим станом, що називається початковим маркуванням (чи розміткою)  $M_0$ . Граф  $N$  мережі Петрі є орієнтованим зваженим дводольним графом і включає вузли (вершини) двох типів, що називають позиціями  $P$  та переходами  $T$ , дуги в яких ведуть або з позиції в перехід, або з переходу в позицію. У графічному вигляді позиції зображуються кружками, а переходи – жирними рисками або прямокутниками. Дуги позначаються відповідною вагою (цілими числами), і дугу з вагою  $k$  можна вважати еквівалентною  $k$  рівнобіжним дугам. Маркування (стан) приписує кожній позиції ціле позитивне число  $M(P)$ , що дорівнює числу фішок у позиції  $P$ . Будь-яка позиція може мати або необмежену, або граничну місткість  $K(P)$ ,

що дорівнює максимально припустимому числу фішок у позиції  $P$ .

У задачах моделювання, де застосовуються поняття умов (станів) і подій, позиції відповідають умовам, а переходи – подіям. Кожен перехід (подія) пов'язаний з визначеним числом вхідних і вихідних позицій – аналогів відповідно до передумов та постумов цієї події. Наявність фішки в деякій позиції інтерпретується як істинність умови, що відповідає даній позиції, а також указує на наявність у позиції  $k$  елементів чи даних відповідної кількості ресурсів.

Мережі Петрі поділяються на елементарні (наявність вхідного, вихідного місць і переходу між ними) і регулярні, що будуються за допомогою операцій з елементарними мережами. Так, регулярна мережа станції може бути приєднана до інших мереж (мереж перегонів та інших станцій), утворюючи при цьому нову мережу вузла.

Процес організації швидкісного залізничного руху покликаний зменшити загальні затрати часу на проходження маршрутів сполучення міст України. Максимальні швидкості руху поїздів категорії Інтерсіті+ обмежені технічними характеристиками рухомого складу, що експлуатується на сьогодні, та параметрами колійного розвитку. Тому ставиться задача не підвищення максимальних швидкостей руху, а оптимізації функціонування інфраструктури та скорочення часу прямування поїздів завдяки досягненню високих показників середньої маршрутної швидкості.

Позначимо пасажирську станцію початку маршруту  $k$ , тоді наступна станція буде  $k + 1$ , при  $k \in [1; K]$ . Кожний поїзд, що пройде станції, позначимо  $i$ , при цьому  $i \in [1; n]$ .

Таким чином, цільова функція буде мати вигляд:

$$F(t) = \sum_{i=1}^n \left[ t_i^{(k;k+1)} + r_i^k \cdot t_{mp.сл}^k + q_i^k \cdot (\alpha^k \cdot t_{зуп}^{(k;i)} + t_{p.у.}^{(k;i)}) \right] \rightarrow \min,$$

де  $t_i^{(k;k+1)}$  – час проходження і-м поїздом перегону від станції k до сусідньої станції k+1, хв;

$$r_i^k = \begin{cases} 1, \text{ якщо } i\text{-й поїзд пройде станцію } k \text{ без зупинки,} \\ 0, \text{ якщо } i\text{-й поїзд зупиняється на станції } k, \\ 0, \text{ якщо станція } k \text{ є початковою/кінцевою станцією} \\ \text{прямування поїзда;} \end{cases}$$

$t_{mp.сл}^{(k;i)}$  – час проходження і-м поїздом станції k, при проходженні і-м поїздом станції k без зупинки (транзитом); хв;

$$q_i^k = \begin{cases} 1, \text{ якщо } i\text{-й поїзд зупиняється на станції } k, \\ 0, \text{ якщо } i\text{-й поїзд пройде станцію } k \text{ без зупинки;} \end{cases}$$

$$\alpha^k = \begin{cases} 1, \text{ якщо станція } k \text{ є проміжною станцією} \\ \text{прямування поїзда,} \\ 0, \text{ якщо станція } k \text{ є початковою/кінцевою станцією} \\ \text{прямування поїзда;} \end{cases}$$

$t_{зуп}^{(k;i)}$  – тривалість стоянки і-го поїзда на k-й станції, хв;

$t_{p.у.}^{(k;i)}$  – час на розгін/уповільнення і-го поїзда при наявності зупинки на станції k, хв.

На лінії Київ – Полтава – Харків здійснюється рух як швидкісних, так і звичайних пасажирських та вантажних поїздів. При цьому доводиться стикатися з численними обмеженнями швидкості, викликаними наявністю кривих, штучних споруд, стрілочних переводів, що потребують зменшення швидкості. Реконструкція лінії дасть змогу зменшити кількість таких ділянок та збільшити середню дільничну швидкість поїздів Інтерсіті+. Необхідно мінімізувати час проходження станцій та перегонів швидкісними поїздами. Для вирішення цієї задачі побудуємо модель руху поїздів за допомогою мереж Петрі.

У поставлених задачах моделювання використовуються поняття умов та подій, умови позначаються позиціями ( $p_i$ ), а події – переходами ( $t_i$ ).

Модель прямування швидкісних поїздів станціями та перегонами показано на рис. 3. У нашому випадку фішкою буде поїзд. Позиції  $P_i$  відображають стан (умови прямування) поїзда в результаті спрацювання переходів.

Побудуємо модель для дослідження процесу проходження ділянки Огульці – Совнаркомівська. У нинішніх умовах на даній ділянці діють такі обмеження швидкості:

- станція Огульці (39 км) – 120 км/год;
- перегін між станціями: до 35 км – 160 км/год, 37,9 – 38,4 км – крива 1 – 140 км/год, 35,5 – 45,5 км – крива 2 – 100 км/год;
- станція Совнаркомівська – 60 км/год.

Поїзд проходить дану ділянку більш ніж за 5 хв. Модель на даній ділянці буде мати вигляд, наведений на рис. 3.

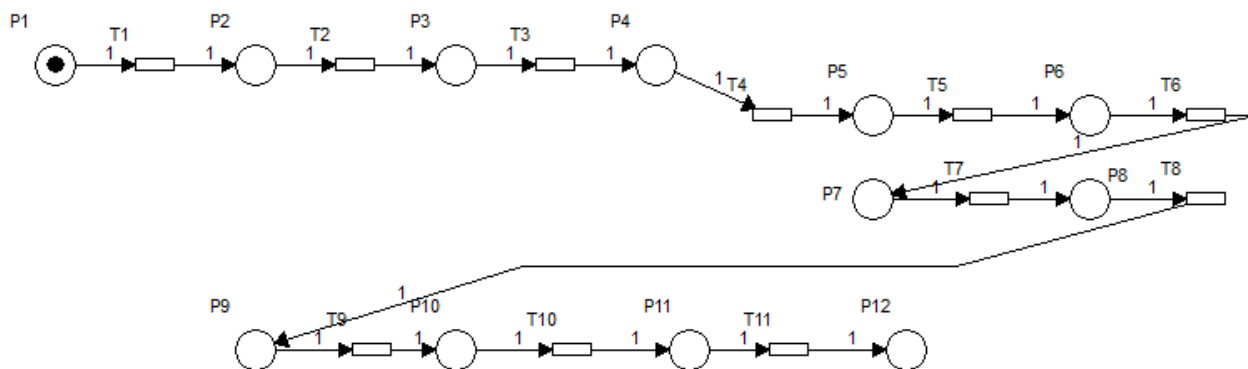


Рис. 3. Модель проходження швидкісним поїздом ділянки Огульці – Совнаркомівська

У даній моделі під позиціями та переходами позначені:  $P_1$  – готовність поїзда до проходження станції Огульці;  $P_2$  – наявність стрілочних переводів, що потребують зменшення швидкості;  $P_3$  – готовність до проходження стрілочних переводів на станції;  $P_4$  – готовність до проходження перегону;  $P_5$  – наявність кривої 1, що потребує зменшення швидкості;  $P_6$  – готовність до проходження кривої 1;  $P_7$  – наявність кривої 2, що потребує зменшення швидкості;  $P_8$  – готовність до проходження кривої 2;  $P_9$  – готовність поїзда до проходження станції Совнаркомівська;  $P_{10}$  – наявність стрілочних переводів, що потребують зменшення швидкості;  $P_{11}$  – готовність до проходження стрілочних переводів на станції;  $P_{12}$  – готовність до проходження перегону;  $T_1$  – проходження ділянки наближення до станції Огульці;  $T_2$  – зниження швидкості;  $T_3$  – проходження стрілочних горловин станції Огульці зі зменшеною швидкістю;  $T_4$  – проходження ділянок віддалення станції;  $T_5$  – зниження швидкості;  $T_6$  – проходження кривої 1 зі зниженою швидкістю;  $T_7$  – зниження швидкості;  $T_8$  – проходження кривої 2 зі зниженою швидкістю;  $T_9$  – проходження ділянки наближення до станції Совнаркомівська;  $T_{10}$  – зниження швидкості;  $T_{11}$  – проходження стрілочних горловин станції Совнаркомівська зі зменшеною швидкістю.

У результаті отримуємо: фішка проходить станції та перегон між ними за час  $T=16$  (рис. 4). Час переходу фішки  $T=1$  у моделі еквівалентний часу прямування поїзда  $t=20$  с. Тобто поїзд проходить  $t=320$  с = 5 хв 20 с.

Після проведення реконструкції та зняття швидкісних обмежень (приведення їх до 140 км/год) модель матиме значно спрощений вигляд (рис. 5).

Позиціями й переходами позначені:  $P_1$  – готовність поїзда до проходження станції Огульці;  $P_2$  – відсутність швидкісних обмежень при прямуванні станцією Огульці;  $P_3$  – готовність до проходження перегону;  $P_4$  – відсутність швидкісних обмежень на перегоні;  $P_5$  – готовність поїзда до проходження станції Совнаркомівська;  $P_6$  – відсутність швидкісних обмежень при прямуванні станцією Совнаркомівська;  $P_7$  – готовність до проходження перегону;  $T_1$  – проходження ділянки наближення до станції Огульці;  $T_2$  – проходження станції Огульці без зменшення швидкості;  $T_3$  – проходження ділянок віддалення станції;  $T_4$  – проходження перегону без зменшення швидкості;  $T_5$  – проходження ділянки наближення до станції Совнаркомівська;  $T_6$  – проходження станції Совнаркомівська без зменшення швидкості.

У результаті фішка (поїзд) буде проходити станції та перегін між ними за час  $T=8$  (рис. 6), тобто за  $t=160$  с = 2 хв 40 с.

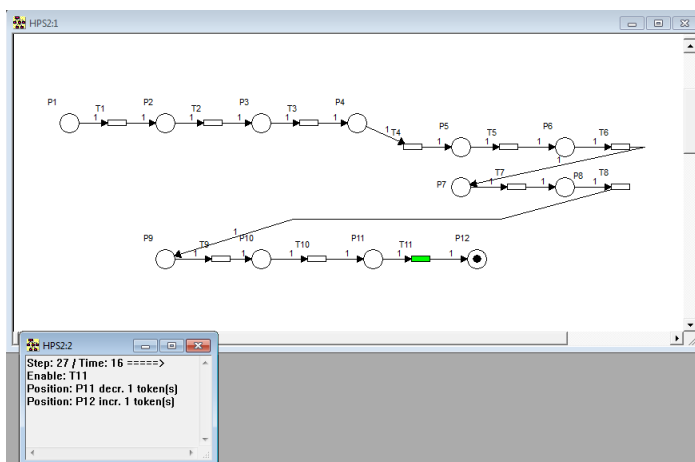


Рис. 4. Результати моделювання проходження ділянки Огульці – Совнаркомівська до реконструкції

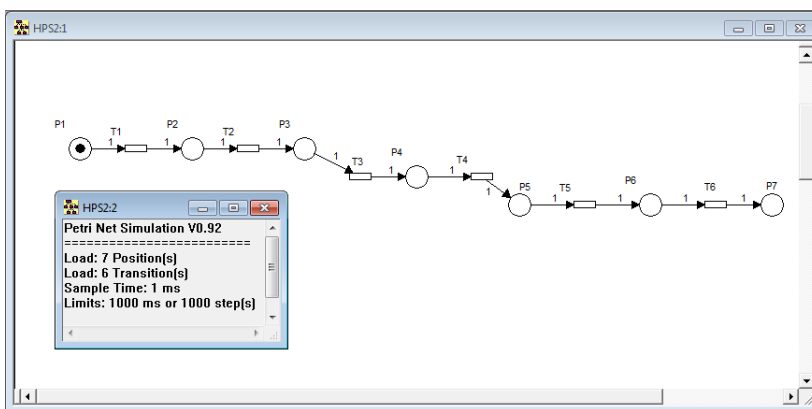


Рис. 5. Модель проходження швидкісним поїздом ділянки Огульці – Совнаркомівська після проведення реконструкції

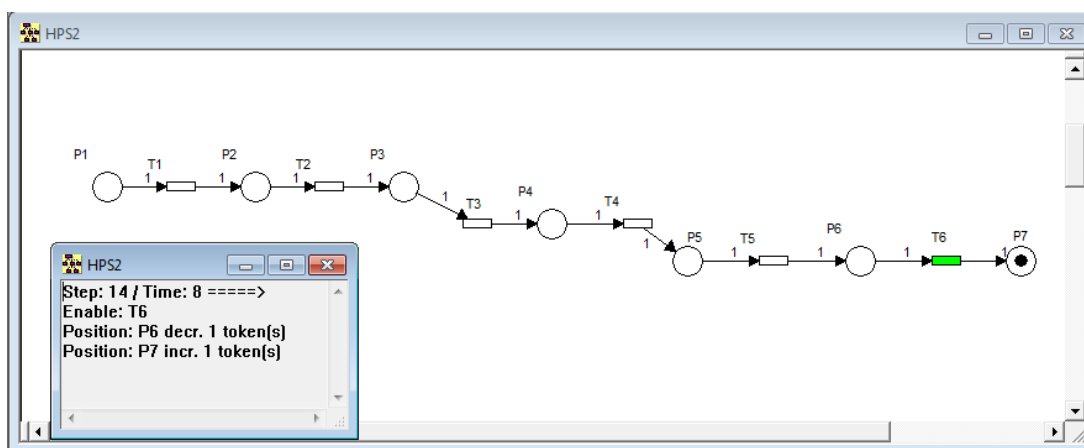


Рис. 6. Результати моделювання проходження швидкісним поїздом ділянки Огульці – Совнаркомівська після реконструкції

Таким чином, використання розробленої моделі дає змогу оцінити часові переваги ще до проведення будь-яких робіт на ділянці і визначити їх майбутню ефективність.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** На підставі виконаного аналізу розвитку систем сучасного високошвидкісного залізничного транспорту, технічних і технологічних рішень, світового досвіду організації швидкісних пасажирських перевезень можна говорити про гостру необхідність удосконалення існуючої залізничної інфраструктури України та скорочення відставання в умовах стрімкого зростання швидкостей руху.

Впровадження швидкісного залізничного руху надасть можливість Україні досягти значних позитивних зрушень як в економічному, так і в соціальному плані. Враховуючи довгостроковість виконання подібних проектів та масштабність потрібних інвестицій, можна з упевненістю говорити про необхідність детального розгляду всіх можливих варіантів реалізації поставленої мети і техніко-економічного обґрунтування вибору оптимального шляху. Саме розроблення політики розвитку на початковому етапі є вирішальним фактором подальшого успіху. Тому для розроблення

програми інтеграції швидкісного руху в транспортний комплекс України необхідно:

- створити потужну базу інфраструктури, що відповідає б світовим стандартам та забезпечувала надійний і безперебійний швидкісний рух;

- визначити найбільш перспективні та економічно вигідні напрямки, розробити мережу швидкісного руху, яка забезпечить доступність для пасажирів та поєднає основні промислові та культурні центри України;

- визначити найприйнятніший варіант рухомого складу із запропонованих світовими виробниками;

- розробити основні технічні, технологічні, організаційні, економічні, правові та екологічні аспекти роботи ВШМ;

- розробити методи та модель розподілу пасажиропотоків при застосуванні швидкісного руху.

Створення високошвидкісної мережі з великою пропускною спроможністю, яка б відповідає світовим та європейським стандартам зокрема, – ось найкращий спосіб підвищення рейтингу залізниць серед інших видів транспорту. Тому необхідною є взаємодія та міжнародний обмін досвідом реалізації таких проектів. Подальше інтегрування українських залізниць в європейську високошвидкісну мережу відкриє нові, значно ширші можливості та перспективи.

### *Список використаних джерел*

1. Альошинський, Є. С. Аналіз можливості організації місцевої роботи на залізничних станціях в умовах впровадження швидкісного пасажирського руху [Текст] / Є. С. Альошинський, О. С. Губачова, С. О. Світлична, Г. О. Сіваконева, Т. О. Ланчак // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2012. – Т. 2. – №3(56). – С. 42-46.

2. Альошинський, Є. С. Організація вантажного руху на станції Лозова Південної залізниці в умовах впровадження швидкісного руху [Текст] / Є. С. Альошинський, О. С. Губачова, С. О. Світлична, Г. О. Сіваконева // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – №3(100). – С. 54-59.

3. Сіваконева, Г. О. Удосконалення технології пасажирських залізничних перевезень у безпересадковому сполученні [Текст]: дис... канд. техн. наук 05.22.01 – транспортні системи / Г. О. Сіваконева. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – 256 с.

4. Примаченко, Г. О. Дослідження сучасного стану системи пасажирських залізничних перевезень в Україні [Текст] / Г. О. Примаченко // Тези Х Ювілейної міжнародної науково-

практичної конференції «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті – ЕКУЗТ 2015» (30 червня – 1 липня 2015 р., м. Одеса (ДЕТУТ)). – К.: ДЕТУТ, 2015. – С. 124-125.

5. Примаченко, Г. О. Розробка пропозицій щодо підвищення доходності пасажирських залізничних перевезень в Україні [Текст] / Г. О. Примаченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2015. – №6/3(78). – С. 33-39.

6. Сіваконева, Г. О. Розвиток швидкісного руху на залізничному транспорті в Україні [Текст] / Г. О. Сіваконева // Сб. науч. тр. SWorld по материалам междунар. науч.-практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований'2011» (20-31 марта 2012 г., г. Одесса). – Одесса, 2011. – Т. 2. – С. 42-44.

7. Акуленко, А. С. Перспективи розвитку залізничних перевезень у сполученні Європа-Азія на території України [Текст] / А. С. Акуленко // Бюл. ОСЗ. – К., 1997. – № 6. – С. 3-6.

8. Алейник, В. С. Будівництво та реконструкція транспортної мережі України для збільшення пропускної спроможності та запровадження швидкісного руху поїздів [Текст] / В. С. Алейник, В. В. Козак та ін. // Залізничний транспорт України. – К., 2010. – №5. – С. 3-6.

9. Анисимов, П. С. Вопросы организации высокоскоростного движения [Текст] / П. С. Анисимов // Железнодорожный транспорт. – М., 2010. – №6. – С. 73-77.

10. Грищенко, Н. В. Напрямки реформування та державне регулювання розвитку залізничного транспорту України [Текст] / Н. В. Грищенко // Залізничний транспорт України. – К., 2010. – №2. – С. 10-12.

11. Лючков, Д. С. Високошвидкісний рух світовий досвід та перспективи України [Текст] / Д. С. Лючков, В. О. Патриченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2013. – № 11(45). – С. 14-19.

12. Альошинський, Є. С. Впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів на дільниці Гребінка – Полтава – Красноград – Харків – Лозова. Станція стикування постійного 3,3кВ та змінного 27,5кВ видів тягового струму по ст. Лозова. Розробка технології обслуговування під'їзних і тракційних колій залізничних та промислових підприємств Лозовського вузла [Текст] / Є. С. Альошинський, О. М. Огар, М. Ю. Куценко, Г. О. Сіваконева, О. С. Губачова, С. О. Світлична // Звіт про НДР ДР 0112U000423. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 362 с.

13. Советов, Б. Я. Моделирование систем [Текст]: учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.

14. Мурашко, А. Г. Первое знакомство с сетями Петри [Текст] / А. Г. Мурашко // Учебное пособие. – К.: УМК ВО, 1988. – 71 с.

15. Сіваконева, Г. О. Побудова математичних моделей технологічних ліній обробки пасажирських поїздів на залізничних станціях [Текст] / Г. О. Сіваконева // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 131. – С. 61-67.

Рецензент д-р техн. наук, професор Є. С. Альошинський

---

Примаченко Ганна Олександрівна, кандидат технічних наук, асистент, кафедра транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ).

Тел.: 057-730-19-55. E-mail: AnnaPrimachenko@i.ua.

Аскеров Зульфугар Аскер Огли, магістрант кафедри транспортних систем та логістики, Інститут перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту (ІППК УкрДУЗТ). Тел.: 057-730-19-55.

Prymachenko Ganna Oleksandrivna, Ph.D., assistant, The Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport (UkrSURT). Ph.: 057-730-19-55. E-mail: AnnaPrimachenko@i.ua.  
Askerov Z. A., Undergraduate of transport systems and logistics, Institute of retraining and advanced training of Ukrainian State University of Railway Transport (IRAT UkrSURT). Ph.: 057-730-19-55.

Стаття прийнята 18.04.2016 р.



УДК 656.223:658.818

## АНАЛІЗ РІВНЯ СЕРВІСУ В УМОВАХ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНИХ ВУЗЛІВ НА ВИСОКОШВИДКІСНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ МАГІСТРАЛЯХ

Д-р техн. наук Д. В. Ломотько, магістрант Г. Г. Даценко

## АНАЛИЗ УРОВНЯ СЕРВИСА В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГИСТРАЛЯХ

Д-р техн. наук Д. В. Ломотько, магистрант Г. Г. Даценко

## ANALYSIS OF LEVEL OF SERVICE IN THE RAIL HUBS HIGH-SPEED LINES

Doct. of techn. Sciences D. V. Lomotko, master G. G. Dacenko

*Подано критерії для створення ефективної, рентабельної комплексної транспортної системи обслуговування пасажирів у великих містах. Виявлено основні напрямки розвитку сервісу пасажирських перевезень у великих транспортних вузлах: розвиток інтелектуальних транспортних систем; інтеграція рішень щодо проїзних документів; збільшення провізної і пропускної спроможності. Для ТПВ за участю швидкісного залізничного транспорту сформовано додаткові вимоги до сервісного обслуговування – особливі планувальні рішення на комерційних зонах ТПВ, наявність і розміщення сервіс-центрів, наявність «перехоплюючих паркінгів». Встановлено, що рівень сервісу та обсяг сервісних послуг в умовах ТПВ в основному залежать від рівня задоволеності пасажирів, рентабельності додаткових видів послуг та доходу комерційної зони ТПВ. Для економічної оцінки ефективності роботи ТПВ та залізничного способу вирішення транспортних потреб пасажирів запропоновано скористатись оцінкою вартості 1 пас.год повних витрат часу на поїздку з метою раціоналізації використовуваних міських територій та зменшення кількості пересадок пасажирів.*

**Ключові слова:** швидкісний залізничний транспорт, сервіс пасажирських перевезень, транспортно-пересадочний вузол (ТПВ), інфраструктурний комплекс, взаємодія видів транспорту.

*Представлены критерии создания эффективной, рентабельной комплексной транспортной системы обслуживания пассажиров в крупных городах. Выявлены основные направления развития сервиса пассажирских перевозок в крупных транспортных узлах: развитие интеллектуальных транспортных систем; интеграция решений в области проездных документов; увеличение провозной и пропускной способности. Для ТПУ с участием скоростного железнодорожного транспорта сформированы дополнительные требования к сервисному обслуживанию – особые планировочные решения в коммерческих зонах ТПУ, наличие и размещение сервис-центров, наличие «перехватывающих паркингов». Установлено, что уровень сервиса и объем сервисных услуг в условиях ТПУ в основном зависят от уровня удовлетворенности пассажиров, рентабельности дополнительных видов услуг и дохода коммерческой зоны ТПУ. Для экономической оценки эффективности работы ТПУ и решения транспортных потребностей пассажира с использованием железных дорог предложено воспользоваться оценкой стоимости 1 пасс.ч полных затрат времени на поездку с целью рационализации используемых городских территорий и уменьшения количества пересадок пассажиров.*

**Ключевые слова:** скоростной железнодорожный транспорт, сервис пассажирских перевозок, транспортно-пересадочный узел (ТПУ), инфраструктурный комплекс, взаимодействие видов транспорта.

*Modern TИH featuring high-speed and high-speed rail transport is the place to address transport needs of passengers and characterized by considerable unevenness passenger for periods of the day. Also criteria for creating an efficient, cost-effective integrated transportation system passenger service in big cities. The basic directions of passenger transportation services in major transport hubs - the development of intelligent transport systems; integration solutions for the travel documents, and increase carrying capacity. For solid hubs with the participation of high-speed rail transport generated additional requirements for service - specific planning solutions in commercial areas TИH, availability and deployment of service-center, intercepting the availability of parking. It was established that the level of service and the amount of services in terms of solid hubs mainly depend on the level of passenger satisfaction, profitability of additional services revenue and commercial areas TИH. The technique and formed recommendations on the investment efficiency of operation of TИH on the basis of technical, technological, economic, organizational components and possibilities of modern information and communication technologies in the interaction of different modes of transport. It also provides guidance on EU financing of infrastructure type (Regulation EU # 1083/2006). For economic evaluation of the efficiency of TИH and train a way to solve transportation needs of the passenger asked to use the valuation passenger-hours full time spent on the trip used to streamline urban areas and reduce the number of direct passengers.*

**Keywords:** high-speed rail, passenger transport services, transport interchange hubs (TИH), infrastructure complex, interaction of transport.

**Вступ.** Основним завданням пасажирського залізничного транспорту є повне задоволення потреб населення в перевезеннях. Достатньо сказати, що ПАТ "Укрзалізниця" об'єднує шість регіональних залізниць і близько 140 інших структурних підприємств. В управлінні Укрзалізниці перебуває 21,6 тис. км залізничних колій, близько 4 тис. локомотивів і 123 тис. вагонів. На частку УЗ припадає близько 60 % обсягу вантажних і 38 % пасажирських перевезень в Україні. Одна з найважливіших проблем великих міст визначається необхідністю комплексної модернізації і нової структуризації транспортних мереж і інфраструктури транспорту шляхом формування і розвитку транспортно-пересадочних вузлів (ТПВ), що забезпечують найбільш ефективну взаємодію усіх елементів транспортної системи.

**Постановка проблеми.** Основним завданням залізничного транспорту у сфері

пасажирських перевезень є найбільш повне задоволення потреб населення. Незважаючи на вдосконалення процесів проектування і експлуатації транспортних систем пасажирського транспорту, для великих міст є характерною тривалість переміщення пасажира з початкового пункту до кінцевого в межах від 35 до 90 хвилин. Дослідження показують, що час перебування пасажира у ТПВ становить приблизно чверть загального часу переміщення [2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Виконані раніше наукові дослідження у галузі функціонування ТПВ та системи надання сервісних послуг на них не достатньо враховують специфіку ринкової економіки [1, 9]. Реалії вітчизняної галузі свідчать про можливість використання закордонного досвіду організації швидкісного руху, формування та проектування ТПВ [3], особливо у зв'язку з подальшим розвитком великих міст в

умовах взаємодії з різними видами пасажирського транспорту [4].

Проблемні питання функціонування, формування і розвитку сервісу на ТПВ стали широко розглядатися в науковій фаховій спеціалізованій літературі [7, 8] із зростанням мережі залізниць. Незважаючи на достатньо широке використання методів математичного аналізу та апарату нечітких множин для прогнозування, моделювання динаміки та опису взаємодії пасажиропотоків в ТПВ, практичне застосування отриманих підходів на залізницях є вкрай обмеженим [5, 9].

**Формулювання мети (постановка завдання).** Метою досліджень є визначення необхідного рівня сервісу на основі критеріїв з метою створення ефективної транспортної системи великих міст. Це запропоновано здійснити за рахунок виявлення основних напрямків розвитку сервісу пасажирських перевезень в умовах швидкісного руху та у великих

транспортних вузлах, а також з метою визначення причин вибору пасажиром виду транспортних засобів та способу переміщення на ТПВ.

**Основна частина.** За даними ПАТ «Укрзалізниця» характер пасажирських перевезень у межах держави визначається високою інтенсивністю контактів із дрібними станціями. Цим видом перевезень найбільш часто користуються студенти, підприємці, родичі і друзі. У західних напрямках переважним напрямом вважається перевезення до Львова. Чернівці, Тернопіль, Хмельницький мають однакову інтенсивність контактів і з Києвом, і зі Львовом. Також до Львова їздять з усієї України – це яскраво виражений туристичний потік, тобто можна говорити про успіх туристичних поїздок до міста. Пасажиропотік в обидва напрямки з розподілом по основних містах держави наведено на рис. 1.



Рис. 1. Пасажиропотік в обидва напрямки з розподілом по основних містах держави, тис. пасажирів (дані Укрзалізниці за 2014 рік)

Таким чином, формування сучасних ТПВ має сенс починати з найбільш завантажених транспортних вузлів та напрямів (див. рис. 1). При формуванні комплексної транспортної системи великих міст слід виявити та врахувати причини (соціальні, психологічні і демографічні), що визначають вибір пасажиром способу переміщення і тип транспортних засобів. У багатьох дослідженнях доведено, що в першу чергу для пасажирів великого міста на обрання маршруту пересування впливає тривалість часу, витраченого на поїздку. Тому фактор часу є одним з основних параметрів, що впливають на вибір виду транспорту за інших рівних умов, – пасажирів в цілому задовольняє вартість проїзду цим видом транспорту та якість обслуговування у цьому випадку. В той же час скорочення часу поїздки в межах міста можливе за рахунок збільшення швидкостей руху транспортних засобів при організації швидкісних внутрішньоміських і приміських перевезень залізничним або іншим видом транспорту з мінімальним числом зупинок [5].

На вітчизняних залізницях впровадження швидкісного руху почалося з 2002 року, нині здійснюються практичні кроки до використання при перевезенні пасажирів швидкості більш ніж 160 км/год. Досвід показує [10], що може не відбутися істотного скорочення часу поїздки пасажирів з початкового пункту до кінцевого тільки за рахунок збільшення швидкості руху транспортних засобів на окремих ділянках шляху. Це частіше пов'язано із значним часом перебування пасажирів на ТПВ у процесі пересадки та очікування між різними видами транспорту. У більшості випадків цей час може бути визначено нераціональною планувальною організацією ТПВ та недостатньою координацією в роботі взаємодіючих у ТПВ видів транспорту. Тому однією з головних задач, вирішення якої дасть змогу скоротити загальний час поїздки пасажирів, є вибір раціональних

параметрів ТПВ як центрів взаємодії швидкісного залізничного та інших видів пасажирського транспорту.

Зараз сучасний ТПВ – багатовимірний за параметрами, багатофункціональний та складний за структурою транспортний об'єкт. Таким чином, проблеми формування, функціонування і розвитку ТПВ, що розташовано у великих містах, перебувають у сфері функціонування окремих типів ТПВ. Останні розрізняються як пункти взаємодії різних видів пасажирського транспорту як зовнішніх, так і внутрішніх, і на елементи швидкісного пасажирського комплексу залізничного транспорту. Тому вдосконалена (в порівнянні з [10]) класифікація ТПВ у вигляді структурної схеми містить не тільки транспортну, але враховує містобудівну складову (рис. 2). Крім основних характеристик ТПВ за участю швидкісного залізничного транспорту з урахуванням можливого часу перебування пасажирів у класифікації використано додаткові критерії – планувальне рішення ТПВ, наявність і розміщення сервіс-центру, наявність «перехоплюючого» автопаркування.

Традиційне вирішення задачі вибору параметрів ТПВ, що формуються за участю швидкісного та високошвидкісного залізничного транспорту, базується на раціоналізації структури ТПВ з урахуванням закономірностей формування пасажиропотоків, ефективності управління пасажирськими перевезеннями та з визначенням необхідного рівня сервісу у сервіс-центрах.

Структура, характер і напрям транспортних потоків являють собою головні фактори, що визначають транспортно-планувальну структуру ТПВ. У даний час пасажирів, які користуються транспортом, можна розбити на три групи залежно від їх пріоритетів (отже, за ними пасажир буде визначати якісну оцінку сервісу), що впливають на привабливість того чи іншого виду транспорту:

- повна вартість поїздки між пунктами відправлення та призначення;

- час, що витрачається пасажиром на поїздки між пунктами відправлення та призначення з урахуванням тривалості

пересадки між видами транспорту та часу очікування на ТПВ;

- рівень сервісного обслуговування.

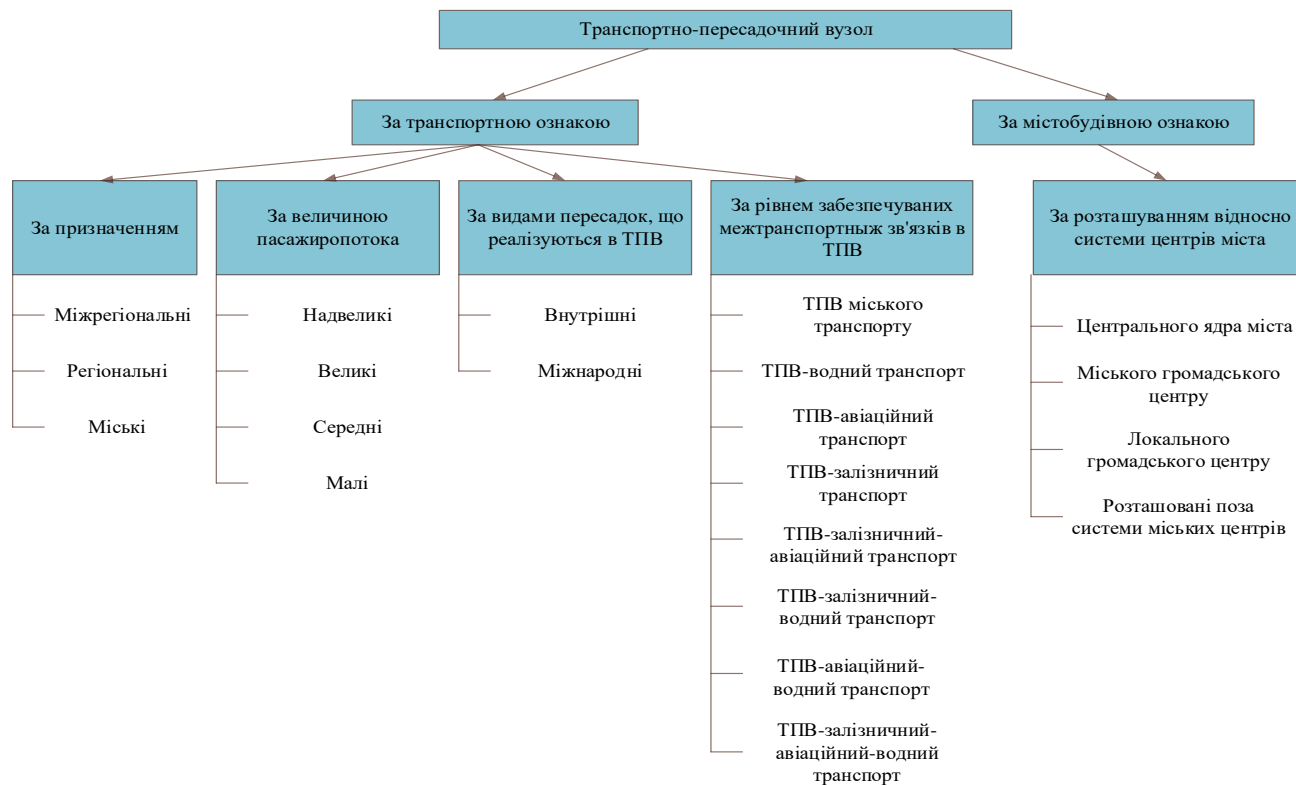


Рис. 2. Удосконалена класифікація транспортно-пересадочних вузлів

Відомі рішення, які спрямовані на загальну задачу підвищення популярності швидкісного залізничного транспорту, найбільш часто відносять до таких основних напрямів розвитку сервісу пасажирських перевезень на ТПВ, зокрема:

- розвиток елементів інтелектуальних транспортних систем за рахунок встановлення детекторів руху, адаптивних інформаційних табло, засобів дистанційної діагностики, прогнозування транспортних ситуацій;
- створення системи «перехоплюючих» автопаркінгів або терміналів міського транспорту;
- розширення міської транспортної мережі для перевезень транзитних пасажирів та розширення мережі метрополітену;

- впровадження інтеграційних рішень щодо проїзних документів, створення комплексної тарифної політики, використання єдиного інтермодального квитка та автоматизація системи продажу;

- збільшення провізної і пропускнуої спроможності міських та міжміських магістралей;
- розвиток нових швидкісних магістральних видів транспорту;
- впровадження сучасних науково-обґрунтованих методів, техніки і технологій;
- створення системи прискореної доставки дрібних вантажів і багажу швидкісним залізничним транспортом.

Підвищення рівня сервісного обслуговування передбачає надання

додаткових послуг пасажиром та відвідувачам ТПВ. У зоні додаткового обслуговування клієнтів на ТПВ організуються супутні об'єкти сервісного обслуговування. Вони надають послуги, що доповнюють основну транспортну послугу та підвищують комерційну та інвестиційну привабливість площі всього ТПВ. Головний напрям розвитку супутніх бізнесів у ТПВ – здавання в оренду елементів громадських зон, що забезпечує високоякісну структуру супутніх продуктів і послуг для пасажирів. Аналіз технології роботи деяких ТПВ, наведений у [6], надав змогу сформулювати перелік можливих додаткових послуг, що надаються пасажиром та відвідувачам ТПВ (рис. 3).

Важливою складовою високого рівня сервісу є формування раціональної структури на ТПВ з виділенням відповідних зон за видами послуг, що

надаються пасажиром та відвідувачам. Для діючих та реконструйованих сучасних ТПВ частка комерційної зони від загальної площі в середньому складає 31 %, близько 29 % займають паркінги і тільки 17 % – пішохідні комунікації. Досвід експлуатації ТПВ показує необхідність зниження частки комерційних площ за рахунок переваги пішохідних і транспортних зон, а також створення сервіс-центрів, які забезпечать концентроване виконання сервісних функцій. Тому сучасний ТПВ можна визначити як складний інфраструктурний комплекс, що включає в себе земельні ділянки з розташованими на них, над ними або під ними об'єктами транспортного та іншого призначення і призначений для забезпечення безпечного та комфортного обслуговування пасажирів у місцях пересадок з одного виду транспорту на інший [9].

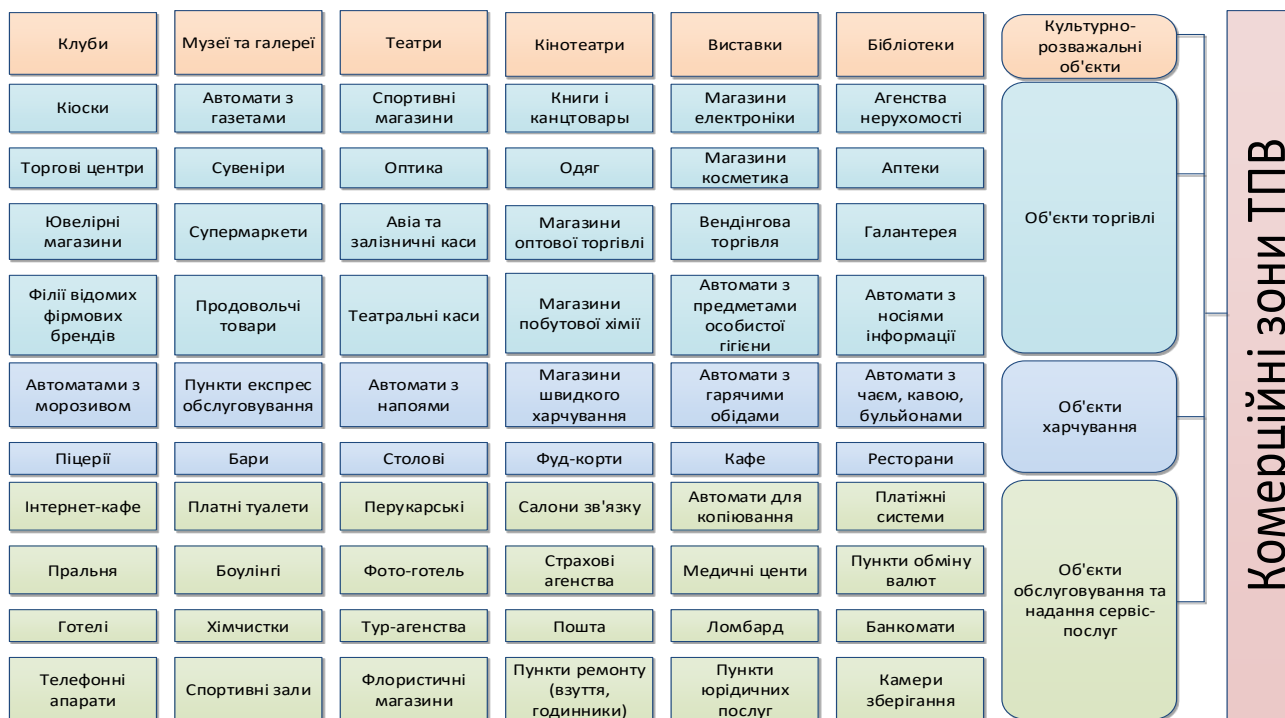


Рис. 3. Комерційні та сервісні послуги, що надаються пасажиром та відвідувачам ТПВ

До показників ефективності, що враховують інтереси пасажирів, відносять:

повні витрати часу на поїздку. Вони включають час на поїздку в транспорті  $t_{п}$ ,

на пішохідні підходи  $t_{підх}$ , на очікування транспорту  $t_{оч}$ , а також тривалість пересадки  $t_{пер}$  з урахуванням узгодженості графіка руху:

$$T = t_{п} + 2 t_{підх} + t_{оч} + t_{пер}. \quad (1)$$

Час, що витрачається на поїздки в транспорті,

$$t_{п} = \frac{60 L}{v_{м}}, \quad (2)$$

де  $L$  – відстань поїздки пасажирів, км;

$v_{м}$  – маршрутна швидкість перевезень на заданому напрямку, км/год.

Для визначення середньої відстані поїздки  $L$  слід скористатися статистичними даними Укрзалізниці. Зокрема пасажиропотік ТПВ залізничного вузла Харків за даними Укрзалізниці за 2014-2015 рік наведено на рис. 4.

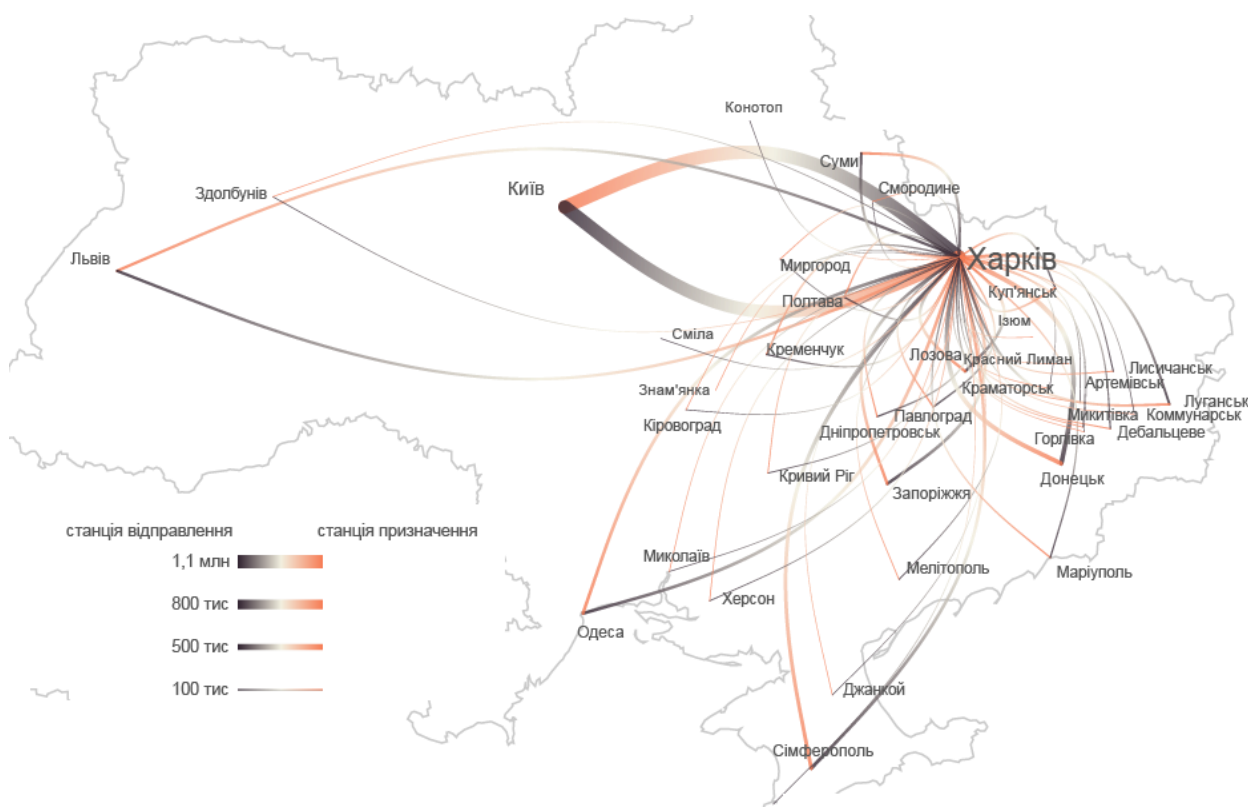


Рис. 4. Пасажиропотік ТПВ Харків (дані Укрзалізниці за 2014 – 2015 рік)

Оцінку часу очікування транспорту здійснюють на основі середнього інтервалу руху транспорту [7], наприклад, застосовують відому формулу

$$t_{оч} = \frac{I_p}{2} + \frac{D_{I_p}}{2I_p} \quad (3)$$

де  $I_p$  – середній інтервал руху, хв;

$D_{I_p}$  – дисперсія інтервалу руху транспорту.

Тривалість пішохідного підходу та очікування є характеристиками доступності ТПВ. Закордонний досвід показує, що система ТПВ має задовільну доступність, якщо з 75 % пунктів у великому місті можна досягти ТПВ за 45 хвилин. Пасажирів і відвідувачів мають можливість дістатися до будь-якої точки ТПВ за час не більше 5 хвилин.

Для економічної оцінки ефективності роботи ТПВ та залізничного способу

вирішення транспортних потреб пасажирів можна скористатись вартістю 1 пас.год для

повних витрат часу на поїздку:

$$E_{mn} = \sum_N e_{nc} T = \sum_N e_{nc} \left( \frac{60L}{v_k} + 2 \frac{60l_{nidx}}{v_{nidx}} + \frac{I_p}{2} + \frac{D_{I_p}}{2I_p} + \frac{0.06l_{ТПВ}}{v_{nidx}} \right) \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $l_{pidx}$  – середня відстань переміщення пасажирів, км;

$v_{pidx}$  – середня швидкість переміщення пасажирів, км/год;

$l_{ТПВ}$  – відстань переміщення пасажирів при здійсненні пересадки, м;

$N$  – пасажирообіг ТПВ.

Замість повних витрат часу пасажирів допускається використати скорочення цих витрат або їх складових, що стосуються безпосередньо поїздки та (або) пов'язані з перебуванням пасажирів у ТПВ.

Подальший аналіз рівня сервісу показав, що з усього різноманіття критеріїв можна виділити три основних, що характеризують ефективність зонування площ ТПВ:

- *рівень задоволеності користувачів*  $R_{зд}$ , який дає змогу оцінити ефективність використання приміщень ТПВ з точки зору пасажирів. При цьому ступінь насичення товарами і послугами має відповідати обсягам потреб користувачів ТПВ. Оцінити рівень задоволеності дозволяють обстеження пасажиропотоку за допомогою анкет, в яких відбиваються такі дані: віддаленість ТПВ від будинку і місця роботи; число пересадок під час поїздки; сумарний час поїздки; час, що витрачається на пересадку; задоволеність супутнім обслуговуванням у ТПВ;

- *рентабельність додаткових видів послуг*  $R_{рн}$ , що надаються в ТПВ, – дає змогу зробити висновок про необхідність і доцільність надання окремих видів додаткових послуг. Рентабельність послуги

вважається задовільною, якщо вона не нижче 5 % від доходу;

- *дохід на 1 м<sup>2</sup> комерційної зони ТПВ*  $R_{дх}$  – дає можливість оцінити ефективність використання площ та приміщень, зробити висновки про найбільш прибуткові види послуг і про ефективність зонування приміщень ТПВ згідно з переліком наданих послуг.

Тоді комплексно рівень сервісу обслуговування з точки зору використання ТПВ можна оцінити таким чином:

$$\Omega_C = k_{зд} R_{зд} + k_{рн} R_{рн} + k_{дх} R_{дх}, \quad (5)$$

де  $k_{зд}$ ,  $k_{рн}$ ,  $k_{дх}$  – відповідно вагові коефіцієнти рівнів виконання задоволеності, рентабельності та доходу,  $k_{зд} + k_{рн} + k_{дх} = 1$ . Ці вагові коефіцієнти мають встановлюватись шляхом опитування клієнтів.

З урахуванням комплексного показника рівня сервісу обслуговування можна сформулювати рекомендації щодо основних елементів комерційних зон на ТПВ (див. таблицю).

Одним з основних якісних параметрів функціонування ТПВ за участю швидкісного залізничного транспорту є відстань, яку необхідно подолати пасажирів, щоб здійснити пересадку з одного виду транспорту на інший. При цьому досвід показує, що максимальна дальність пішого проходу при пересадці не має перевищувати 100-150 м, а час на пересадку – не більший за 3-5 хвилин.



## Вимоги до розміщення основних елементів комерційної зони ТПВ

Елемент зони ТПВ	Вимоги до розміщення елемента та його складу
1	2
Квиткові каси	Групове розміщення з об'єднанням за категоріями пасажирів. Перед квитковими касами необхідно передбачати вільну зону накопичення пасажирів (рекомендована глибина не менше 3...4 м)
Вестибюлі вокзалів залізничних станцій і ТПВ	Розташування переважно з боку міста. Забезпечення зручного зв'язку з квитково-касовими залами, інформаційно-довідковими об'єктами, камерами схову. Після вестибюля має розташовуватися розподільний зал. Для малих ТПВ можливе об'єднання вестибюлів із залами очікування
Зали очікування	Зручний зв'язок з вестибюлем, об'єктами харчування, туалетами і виходами до перонів. Рекомендовано в одному з ними рівні. Для великих ТПВ можливе облаштування декількох залів очікування
Автомати для продажу квитків	Встановлювати на шляху прямування пасажирів відправлення і в касових залах
Камери схову	Поблизу шляхів прямування пасажирів прибуття або в місцях поряд з квитковими касами. Зберігання ручної поклажі переважно в автоматичних камерах схову
Багажні приміщення	Передбачити під'їзди для вантажних і спеціальних автомобілів. Багажні каси і автомати для оплати за зберігання ручного багажу слід розміщувати поблизу місць зберігання
Посадочні термінали різних видів транспорту	Максимальна дальність пішого підходу пасажирів між посадочними терміналами у ТПВ не мають перевищувати 100...150 м
«Перехоплюючий» паркінг	Забезпечення зручних пішохідних в'язків з об'єктами інфраструктури різних видів транспорту на ТПВ. Рекомендовано розташовувати у верхніх або підземних поверхах ТПВ
Автомобільний паркінг короткотермінового перебування	Переважно в підземній частині комплексу. У різних рівнях з «перехоплюючим» паркінгом
Санітарні вузли	Кількість санітарних вузлів ТПВ розраховують за максимальним добовим пасажиропотоком. Розташовуються переважно поряд із залами очікування або по маршруту прямування пасажирів і відвідувачів ТПВ. Рекомендується облаштування додаткових зовнішніх санітарних вузлів для літнього періоду

Продовження таблиці

1	2
Готелі	Ізольовано від найбільш шумних приміщень і зон ТПВ. По можливості передбачити спеціальні виходи до місць посадки-висадки пасажирів
Інформаційно-довідкові об'єкти	Розміщувати приблизно до головних шляхів руху основних потоків пасажирів, поблизу від входів у вестибюль або касовий зал Число інформаційно-довідкових об'єктів у ТПВ встановлюють залежно від добового пасажиропотоку, інформаційної оснащеності ТПВ та кількості взаємодіючих видів транспорту
Об'єкти харчування	Не рекомендовано, щоб вони були прохідними. Розташування поряд із залами очікування. Площі приміщень під об'єкти харчування слід приймати відповідно до добового пасажиропотоку
Об'єкти обслуговування	Розміщення об'єктів має передбачатися на рівнях вище або нижче рівня пересадки пасажирів. При пересадці з одного виду транспорту на інший пасажир повинен мати вибір – прямувати через зону розташування комерційних об'єктів або минути її для заощадження часу
Об'єкти торгівлі	
Культурні та розважальні об'єкти	
Технічні, адміністративні та побутові приміщення	Мають бути облаштовані в ТПВ окремим входом. Адміністративні приміщення, пов'язані з обслуговуванням пасажирів, мають бути максимально наближені до вестибюля і залів очікування

**Висновок.** Сучасні ТПВ за участю швидкісного та високошвидкісного залізничного транспорту є місцем вирішення транспортних потреб пасажирів і характеризуються значною нерівномірністю пасажиропотоків за періодами доби. Рівень сервісу та обсяг сервісних послуг в умовах ТПВ в основному залежать від рівня задоволеності пасажирів, рентабельності додаткових видів послуг та доходу комерційної зони ТПВ. Оскільки найбільший потік пасажирів спостерігається в ранкові та вечірні години пік, то розрахунок компонування та обґрунтування вимог до комерційних зон ТПВ слід здійснювати саме на ці періоди. Пояснюється це тим, що обсяги максимальних добових пасажиропотоків утворюються саме в часи пік і зазвичай їх частка складає до 50 % добового потоку

пасажирів ТПВ. Розроблено методику і сформовано рекомендації щодо інвестиційної ефективності експлуатації ТПВ з урахуванням технічної, технологічної, економічної, організаційної складових та можливості застосування сучасних інформаційно-комунікаційних технологій при взаємодії різних видів транспорту. Вона також містить рекомендації країн Євросоюзу щодо фінансування проектів інфраструктурного типу (Регламент ЄС № 1083/2006, стаття 40). Для економічної оцінки ефективності роботи ТПВ та залізничного способу вирішення транспортних потреб пасажирів запропоновано скористатись оцінкою вартості 1 пас.год для повних витрат часу на поїзду з метою раціоналізації використовуваних міських територій та зменшення кількості пересадок пасажирів.

*Список використаних джерел*

1. Yixiang Yue, Shifeng Wang, Leishan Zhou, Lu Tong, M. Rapik Saat, Optimizing train stopping patterns and schedules for high-speed passenger rail corridors [Електронний ресурс] // Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 63, February 2016, P. 126-146, ISSN 0968-090X. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.12.007>.
2. Каретников, А. Д. Координация работы различных видов транспорта [Текст] / А. Д. Каретников, А. В. Комаров. – М.: Транспорт, 1964. – 200 с.
3. Helbing, D. Social force model for pedestrian dynamics [Text] / D. Helbing // Physical review E, May 1995.
4. Ломотько, Д. В. Formation of fuzzy support system for decision-making on merchantability of rolling stock in its allocation [Електронний ресурс] / Д. В. Ломотько, А. О. Ковальов, О. В. Ковальова // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Т. 6. – №. 3 (78). – С. 11-17. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54496>
5. Бутько, Т. В. Удосконалення системи оперативного прогнозування пасажирських потоків на основі використання інтелектуальних технологій. [Текст] / Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – С. 161-171.
6. Ломотько, Д. В. Аналіз функціонування транспортно-пересадочних вузлів на високошвидкісних залізничних магістралях [Текст] / Д.В. Ломотько, І.С. Марасіна // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізничн. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 154. – С.39-47.
7. Угрюмов, А. К. Оперативное управление движением на железнодорожном транспорте [Текст] / А.К. Угрюмов. – М.: Транспорт, 1983. – 239 с.
8. Торопов, Б. И. Развитие пассажирских комплексов на основе закономерностей формирования пассажиропотоков [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.22.00 / Торопов Борис Иванович. – К.: Киевский институт железнодорожного транспорта, 2000. – 154 с.
9. Евреенова, Н. Ю. Выбор параметров транспортно-пересадочных узлов, формируемых с участием железнодорожного транспорта [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.22.08 / Н. Ю. Евреенова. – М.: Московский государственный университет путей сообщения, 2014. – 255 с.
10. Резер, С. М. Логистика пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте [Текст] / С. М. Резер. – М.: ВИНТИ РАН, 2007. – 516 с.

---

Ломотько Денис Вікторович, д-р техн. наук, професор, кафедра транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-55.

E-mail: [den@kart.edu.ua](mailto:den@kart.edu.ua) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

Даценко Григорій Георгійович, магістрант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-05.

Lomotko Denis, Doct. of techn. sciences, Professor, Department of Transport and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-55. E-mail: [den@kart.edu.ua](mailto:den@kart.edu.ua) ORCID:

<http://orcid.org/0000-0002-7624-2925>

Dacenko Grigory, master Department of Transport and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-55.

Стаття прийнята 18.04.2016 р.

УДК 624.016.001.2

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ШПРЕНГЕЛЬНЫХ БАЛОК

Д-р техн. наук Г. Л. Ватуля, кандидати техн. наук Ю. П. Китов, М. А. Веревичева, асп. С. Д. Синчук

## ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ШПРЕНГЕЛЬНИХ БАЛОК

Д-р техн. наук Г. Л. Ватуля, кандидати техн. наук Ю. П. Кітов, М. А. Веревічева, асп. С. Д. Сінчук

## SOME PECULIARITIES OF TRUSSED BEAMS OPTIMIZATION PROBLEM

Doctor of techn. sciences G. Vatulia, candidate of technical sciences Yu. Kitov, M. Verevicheva, post graduate student S. Sinchuk

*Запропоновано алгоритм оптимізації шпренгельної балки, який базується на її конструктивних властивостях і на вимозі мінімуму згинальних моментів. Вузли нижнього пояса розташовані на мотузковій кривій. Параметрами оптимізації є відстані між стояками. Ефективність алгоритму підтверджується тестовим прикладом. Показано, що запропонований метод оптимізації забезпечує також мінімум об'єму шпренгельної балки.*

**Ключові слова:** оптимізація, шпренгельна балка, згинальний момент, алгоритм.

*Предложен алгоритм оптимизации шпренгельной балки, основанный на ее конструктивных особенностях и на требовании минимума изгибающих моментов. Узлы нижнего пояса располагаются на веревочной кривой. Параметрами оптимизации являются расстояния между стойками. Эффективность алгоритма подтверждается тестовым примером. Показано, что предложенный метод оптимизации обеспечивает также минимум объема шпренгельной балки.*

**Ключевые слова:** оптимизация, шпренгельная балка, изгибающий момент, алгоритм.

*The authors proposed the algorithm of trussed beam optimization based on its design features and requirement of bending moment's minimum. The statically determinate trussed beam was assumed in the article as a composite structure. The optimization was done under the constant loading. Nodes of truss bottom chord located on a funicular curve. Distances between pillars were assumed as optimization parameters. The materials cost for the truss beam construction, which consists of one material, is determined either by mass, or by volume. The optimization criterion of the truss beam with given topology will be the sum of the beam volumes and the truss, which are dependent on the variations of topology variables. The authors assumed that efficiency function (volume function) is smooth and continuous and its minimum is located in the point where all partial derivative from function of the unknown variables are equal to zero. The algorithm's efficiency was confirmed by the test example. It is proved that the offered optimization method also helps to obtain minimum of trussed beam's volume. Utilizing of described procedure helps to provide the logical design of structure optimization taking into account loading condition, combined loading and system indeterminacy.*

**Keywords:** optimization; trussed beam; bending moment; algorithm; optimality criterion.

**Введение.** В настоящее время вопросы экономии материалов приобретают все большую актуальность при проектировании сооружений.

Распространенным видом искусственных сооружений, строящихся на пересечениях пешеходных и транспортных потоков, являются пешеходные мосты. Современное состояние техники строительства создает возможность применения прогрессивных расчетных схем, в частности комбинированных. В качестве одного из элементов пролетных строений пешеходных мостов применяется балка, усиленная шпренгелем.

Разработан ряд методов решения различных задач оптимального проектирования конструкций в канонической постановке [1-8]. Один из методов оптимизации трехпролетной балки, позволяющий улучшить показатели материалоемкости, представлен в [9, 10].

В настоящей работе предлагается метод оптимизации шпренгельных балок, основанный на двух положениях: 1) в комбинированных балочных конструкциях определяющими по затратам материала являются элементы, испытывающие напряженное состояние в виде сжатия с изгибом; 2) в элементах, работающих на сжатие с изгибом, уменьшение размеров сечения в большей степени определяется

уменьшением изгибающего момента. Поэтому в данной работе предлагается критерий оптимальности шпренгельных балок, основанный на минимизации значений изгибающих моментов.

**Цель и задача исследований.** Шпренгельные балки как представители распорных систем обладают следующим свойством: если нижний пояс шпренгеля очерчен по веревочной кривой, соответствующей заданной постоянной нагрузке, и связи балки с нижним поясом шпренгеля образуют некоторый континуум, то изгибающие моменты в балке равны нулю. На самом деле конструкция предполагает, что связь балки и нижнего пояса шпренгеля осуществляется в виде ряда стоек (рис. 1). В результате в балке все же возникнут изгибающие моменты – отрицательные над стойками и положительные между ними. Величины их зависят от количества стоек и их расположения по пролету.

**Целью работы** является разработка алгоритма определения оптимального расположения стоек  $z_j$  при заданном их количестве  $n$  ( $z_j$  – расстояние между стойками с номерами  $j-1$  и  $j$ ,  $j=1, \dots, n/2$ ).

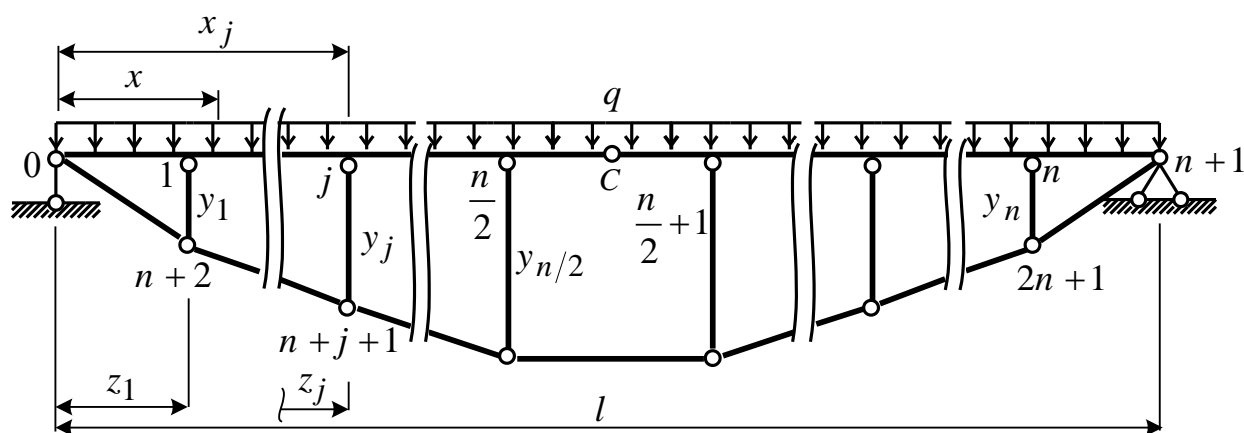


Рис. 1. Схема шпренгельной балки

Для получения оптимального проекта шпренгельной балки необходимо найти такие значения переменных, чтобы затраты на изготовление балки (объем материала, масса и стоимость) были наименьшими. При этом должны удовлетворяться:

– условие прочности растянутых элементов

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq mR_y, \text{ или } A \geq \frac{N}{mR_y}; \quad (1)$$

– условие устойчивости сжатых стержней

$$\sigma = \frac{|N|}{\varphi A} \leq mR_y, \text{ или } A \geq \frac{|N|}{\varphi mR_y}; \quad (2)$$

– условие прочности для балки постоянного сечения, работающей на изгиб со сжатием

$$\sigma = \frac{|M|}{W} + \frac{|N|}{A} \leq mR_y, \text{ или } A \geq \frac{|N|}{\varphi mR_y}; \quad (3)$$

– конструктивные ограничения гибкости стержней

$$\lambda \leq \lambda_{adm}, \text{ или } A(\lambda) \geq A_{adm}. \quad (4)$$

Последнее условие можно записать в виде

$$A_{adm} = \left( \frac{l}{m_1 \lambda_{adm}} \right)^2, \quad m_1 = \sqrt{\frac{J}{A^2}}. \quad (5)$$

Для решения задачи оптимизации получим общие зависимости для определения реакций, усилий, площадей сечений и объема шпренгельной балки от оптимизируемых переменных (размеры панелей  $z_j$  и стрела веревочной кривой  $f$ ). Зависимости приведены для левой половины конструкции.

**Реакции и усилия.** Очевидно, при заданном нагружении (рис. 1)  $R_0 = \frac{ql}{2}$ .

*Усилия в сечениях балочного элемента*

Усилие  $N_{cp}$  в среднем (горизонтальном) элементе нижнего пояса (рис. 1, 2):

$$M_c = 0: \quad R_0 \frac{l}{2} - \frac{ql^2}{8} - N_{cp} \cdot y_{n/2} = 0, \quad N_{cp} = \frac{ql^2}{8y_{n/2}}.$$

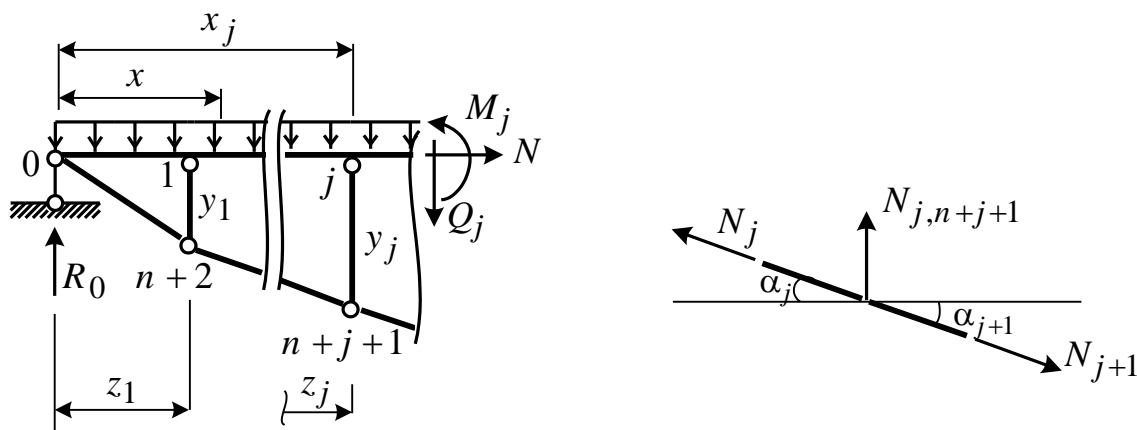


Рис. 2. Усилия, возникающие в элементах и узлах шпренгельной балки

Из условия  $\sum X = 0$  следует

$$N = -N_{cp} = -\frac{ql^2}{8y_{n/2}}.$$

Далее,  $\sum_{лев} M = 0$ , откуда в произвольном сечении  $x$ , где  $x_{j-1} \leq x \leq x_j$  (рис. 2), имеем

$$M(x) = \frac{ql}{2}x - \frac{qx^2}{2} - \frac{ql^2}{8y_{n/2}} \left[ y_{j-1} + \frac{y_j - y_{j-1}}{x_j - x_{j-1}}(x - x_{j-1}) \right], \quad (6)$$

в частности в сечениях над стойками (в опорных сечениях)

$$M_j = \frac{ql}{2}x_j - \frac{qx_j^2}{2} - \frac{ql^2}{8y_{n/2}}y_j, \quad j = 1, 2, \dots, n/2. \quad (7)$$

Усилия в стойках:

$$N_{j,n+j+1} = -\frac{ql^2}{8y_{n/2}}(\operatorname{tg} \alpha_j - \operatorname{tg} \alpha_{j+1}) = -\frac{ql^2}{8y_{n/2}} \left( \frac{y_j - y_{j-1}}{z_j} - \frac{y_{j+1} - y_j}{z_{j+1}} \right), \quad j = 1, 2, \dots, n/2. \quad (8)$$

Усилия в элементах нижнего пояса

Принимаем, что номер элемента нижнего пояса совпадает с номером соответствующей панели. Тогда

$$N_j = \frac{ql^2}{8y_n} \frac{1}{\cos \alpha_j} = \frac{ql^2}{8y_n} \frac{\sqrt{(y_j - y_{j-1})^2 + z_j^2}}{z_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n/2, \quad N_{cp} = N_{n/2+1} = \frac{ql^2}{8y_{n/2}}. \quad (9)$$

**Объем материала шпренгельной балки. Целевая функция.** Затраты материала для изготовления шпренгельной балки, состоящей из материала одного вида, определяются либо объемом, либо массой, что фактически одно и то же. Поэтому в качестве целевой функции при оптимальном проектировании шпренгельной балки с заданной топологией принимают сумму объемов всех элементов, зависящих от вариации топологических переменных.

*Балочный элемент*

В пределах каждой панели (участок балки между стойками) балочного элемента ( $j = 1, 2, \dots, n/2$ ) изгибающий момент достигает некоторого наибольшего значения  $M_{j,max}$ . Используя каждое из этих значений, можно согласно формуле (6) определить объем балочного элемента:

$$V^{(6,j)} = \frac{l}{mR_y} \left( \frac{A}{W} |M_{j,max}| + |N| \right).$$

Расчетное сечение балочного элемента определяется исходя из наибольшего значения изгибающего момента:

$$V^{(\bar{\sigma})} = \max V^{(\bar{\sigma},j)}.$$

Если наибольшее по модулю значение момента  $M_{s0}$  достигается в точке  $x_{s0}$  на интервале  $x_{s-1} \leq x_{s0} \leq x_s$ , то

$$V^{(\bar{\sigma})} = \frac{l}{mR_y} \left( \frac{A}{W} |M_{s0}| + |N| \right),$$

и согласно выражению (6)

$$V^{(\bar{\sigma})} = \frac{ql}{2mR_y} \left\{ \frac{A}{W} \Big|_{x_{s0}} (l - x_{s0}) - \frac{l^2}{4y_{n/2}} \left[ y_{s-1} + \frac{y_s - y_{s-1}}{x_s - x_{s-1}} (x_{s0} - x_{s-1}) \right] + \frac{l^2}{4y_{n/2}} \right\}. \quad (10)$$

### Стойки

Согласно формулам (2) (8), объемы стоек равны:

$$V_{j,n+j+1} = \frac{ql^2 y_j}{8 y_{n/2} \varphi_{j,n+j+1} mR_y} \left( \frac{y_j - y_{j-1}}{z_j} - \frac{y_{j+1} - y_j}{z_{j+1}} \right), \quad j = 1, \dots, \frac{n}{2} - 1;$$

$$V_{n/2, n+n/2+1} = \frac{ql^2}{8 \varphi_{n/2, n+n/2+1} mR_y} \frac{y_{n/2} - y_{n/2-1}}{z_{n/2}}. \quad (11)$$

Определение площадей сечений сжатых стержней производится методом последовательных приближений. Для этого используется аналитическая зависимость

$\varphi_j(\lambda)$ , полученная с помощью интерполяционного полинома Лагранжа на основе табличных значений [11] для интервала гибкости  $60 \leq \lambda \leq 150$ :

$$\varphi_j(\lambda) = 1,111 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda_{np}^3 - 1,389 \cdot 10^{-4} \lambda_{np}^2 - 2,5 \cdot 10^{-3} \lambda_{np} + 0,86, \quad \frac{y_j}{m_1 \sqrt{A}} - 0,6. \quad (12)$$

Если  $\lambda < 60$ , принимается  $\varphi = 1$ .

### Элементы нижнего пояса

Согласно формулам (1), (9), объемы элементов нижнего пояса равны:

$$V_j = \frac{ql^2}{8y_{n/2}mR_y} \frac{(y_j - y_{j-1})^2 + z_j^2}{z_j}, \quad j = 1, \dots, \frac{n}{2}; \quad V_{n/2+1} = \frac{ql^2}{8y_{n/2}mR_y} (l - 2x_{n/2}). \quad (13)$$

Таким образом, с учетом формул (10) – (12), объем шпренгельной балки (или целевая функция) имеет вид



$$V = V^{(\delta)} + 2 \sum_{j=1}^{n/2} V_{j,n+j+1} + 2 \sum_{j=1}^{n/2+1} V_j. \quad (14)$$

Вид первого слагаемого целевой функции  $V^{(\delta)}$  зависит от значений переменных, в частности от положения сечения, в котором достигается наибольший момент. Как видно из формул (6), (7) и (10), при непрерывном изменении переменных  $z_j$  максимальный изгибающий момент может скачкообразно переходить от одного сечения к другому. Из этого следует, что целевая функция (14) является разрывной, и ее минимизация приравнением производной нулю невозможна. Значит, классический метод оптимизации конструкции не является приемлемым.

Ниже предлагается метод оптимизации, основанный на использовании конструктивных особенностей шпренгельной балки.

#### **Метод оптимизации, основанный на свойствах распорных систем**

Предлагается метод оптимизации шпренгельных балок, основанный на следующих положениях.

1. В комбинированных балочных конструкциях определяющими по затратам материала являются элементы, испытывающие напряженное состояние в виде сжатия с изгибом.

2. В элементах, работающих на сжатие с изгибом, уменьшение размеров сечения в большей степени определяется уменьшением изгибающего момента.

3. Изгибающие моменты возрастают от опоры к середине пролета.

4. Шпренгельные балки относятся к распорным системам, представителями которых являются арки. Следовательно, у тех и других имеются некоторые общие свойства, например, в трехшарнирных статически определимых арках сечения испытывают внецентренное сжатие, т. е. в них возникают изгибающий момент и продольная сила. Естественно, чем меньше

значения изгибающих моментов, тем меньше размеры сечения, исходя из условия прочности, а значит, меньше затраты материала на изготовление арки, меньше ее стоимость.

Поэтому рациональной, или оптимальной аркой, находящейся под действием, например, только постоянной нагрузки, принято называть арку, ось которой очерчена по веревочной кривой, определяемой видом нагрузки. Во всех сечениях такой арки изгибающие моменты равны нулю, и для ее изготовления необходимо затратить меньше материала, чем для арок, очерченных по другим кривым.

Можно предположить, что этим свойством обладают при определенных условиях и шпренгельные балки. А именно, если нижний пояс шпренгеля очерчен по кривой, соответствующей действующей постоянной нагрузке, и связи балочного элемента с нижним поясом шпренгеля образуют некоторый континуум, то изгибающие моменты в балочном элементе равны нулю.

На самом деле конструкция шпренгельной балки (рис. 1) предполагает, что связи балочного элемента и нижнего пояса шпренгеля осуществляются в виде ограниченного количества стержней (стоек). В результате в балке все же возникнут изгибающие моменты – отрицательные над стойками и преимущественно положительные между ними. Значения их зависят от количества стоек и их расположения в пролете. При изменении положения стоек величины одних моментов увеличиваются, других – уменьшаются. Рациональным является такое их расположение, при котором абсолютные значения моментов уравниваются и являются наименьшими.

5. Изгибающие моменты не зависят от стрелы шпренгеля, если шпренгель очерчен по веревочной кривой для трехшарнирной

арки. Это будет видно далее из формул (20).

На основании анализа вышеизложенных положений предлагается метод

$$M_{расч} = \max_{j=1,2,\dots,n/2} \left( \left| M_j^{on} \right|, \left| M_j^{max} \right| \right) \rightarrow \min, \quad (15)$$

где  $M_j^{on}$  – изгибающий момент в сечении балочного элемента над  $j$ -й стойкой;

$M_j^{max}$  – экстремальный изгибающий момент в сечении между  $(j-1)$ -й и  $j$ -й стойками (в пределах  $j$ -й панели).

При этом должны удовлетворяться два условия оптимальности.

Первое условие

$$\left| M_{n/2}^{on} \right| = \left| M_{n/2}^{max} \right| \quad (16)$$

должно выполняться всегда.

Второе условие будет различным, оно выбирается в зависимости от вида оптимизируемой конструкции балочного элемента:

а) при балочном элементе постоянного сечения по длине всего пролета

$$M_j^{max} = M_{n/2}^{max}, \quad j = 1, 2, \dots, n/2 - 1; \quad (17)$$

оптимизации шпренгельных балок, основанный не на минимизации объема, а на минимизации изгибающих моментов в балочном элементе конструкции, т. е.

б) при балочном элементе кусочно-постоянного сечения (постоянного в промежутках между стойками)

$$M_j^{max} = \left| M_j^{on} \right|, \quad j = 1, 2, \dots, n/2 - 1. \quad (18)$$

### Алгоритм оптимизации

Сформулируем алгоритм оптимального решения задачи для случая шпренгельной балки, которая находится под действием постоянной равномерно распределенной нагрузки  $q$ . В этом случае веревочной кривой является квадратная парабола. Поэтому узлы нижнего пояса шпренгеля считаем расположенными на квадратной параболе:

$$y(x) = 4f x(l-x)/l^2. \quad (19)$$

Опорный и максимальный изгибающие моменты согласно формулам (6), (7), (18) выражаются следующим образом:

$$M_j^{max} = \frac{ql}{2} x_{j,max} - \frac{q(x_{j,max})^2}{2} - \frac{ql^2}{8(l-x_{n/2})x_{n/2}} \times \left[ (l-x_{j-1})x_{j-1} + \frac{(l-x_j)x_j - (l-x_{j-1})x_{j-1}}{z_j} (x_{j,max} - x_{j-1}) \right] \quad (20)$$

где  $x_{j,max}$  – расстояние от начала балки до экстремума в  $j$ -й панели,

$$x_{j,max} = \frac{l}{2} \left\{ 1 - \frac{l[(l-x_j)x_j - (l-x_{j-1})x_{j-1}]}{4z_j(l-x_{n/2})x_{n/2}} \right\}. \quad (21)$$

Как было сказано ранее, поперечное сечение балочного элемента может быть либо постоянным по длине пролета, либо кусочно-постоянным (постоянным в пределах одной панели). Поэтому предложенный итерационный алгоритм оптимизации, начиная со второго приближения, разделяется на два подвида, указанных ранее.

**Алгоритм оптимизации балочного элемента постоянного сечения**

*Приближение 0.* В начальном приближении расстояния между стойками принимаем одинаковыми, разбивая полупролет на  $(n/2)+1$  равных частей:

$$z_j^{(0)} = \frac{l}{2(n/2+1)}, \quad j=1, \dots, n/2.$$

Вычисляем по формулам (20), (21) изгибающие моменты  $M_j^{max}$ ,  $M_j^{on}$  ( $j=1, \dots, n/2$ ) в начальном (нулевом) приближении.

Далее будем изменять каждое значение  $z_j$ ,  $j=1, \dots, n/2$  с заранее выбранным шагом, например,  $\Delta z = 0,01$  м до достижения некоторого указанного ниже условия. Правила изменения  $z_j$  приведены при описании процесса оптимизации.

*Приближение 1.* Начинаем оптимизацию с панели с номером  $n/2$ . На первом приближении необходимо уравнивать значения  $|M_{n/2}^{max}|$  и  $|M_{n/2}^{on}|$ , изменяя для этого  $z_{n/2}$ .

Если  $M_{n/2}^{max} < 0$  или  $M_{n/2}^{max} > 0$ , но  $M_{n/2}^{max} < |M_{n/2}^{on}|$ , то для удовлетворения условия (16) начальное значение переменной  $z_{n/2}^{(0)}$  необходимо

увеличивать. При  $M_{n/2}^{max} > |M_{n/2}^{on}|$  значение  $z_{n/2}^{(0)}$  нужно уменьшать.

Для каждого полученного значения  $z_{n/2}$  вычисляем соответствующие  $M_{n/2}^{max}$ ,  $M_{n/2}^{on}$  до тех пор, пока не будет достигнуто приближенное равенство  $|M_{n/2}^{max}| \approx |M_{n/2}^{on}|$  (очевидно, что при этом будет получено  $M_{n/2}^{max} > 0$ ). Это имеет место при выполнении условия, при котором величины  $|M_{n/2}^{max}| - |M_{n/2}^{on}|$  при двух соседних значениях ( $i, i+1$ ) имеют разные знаки.

Соответствующее значение  $z_{n/2}$  обозначаем  $z_{n/2}^{(1)}$ . Таким образом, значения переменных после первого приближения равны  $(z_{n/2}^{(0)}, z_{n/2}^{(0)}, z_{n/2}^{(1)})$ .

*Приближение j.* На  $j$ -м приближении изменяем значение панелей с номерами  $n/2, n/2-1, \dots, n/2-j+1$ .

Изменяем  $z_{n/2}, z_{n/2-1}, z_{n/2-j+1}$  пошагово по формулам:

$$z_{n/2}^{(j,i)} = z_{n/2}^{(j,i-1)} \pm \Delta z, \quad i=1,2,\dots,$$

$$z_{n/2-1}^{(j,k1)} = z_{n/2-1}^{(j,k1-1)} \pm \Delta z, \quad k1=1,2,\dots$$

.....

$$z_{n/2-j+1}^{(j,kj)} = z_{n/2-j+1}^{(j,kj-1)} \pm \Delta z, \quad kj=1,2,\dots,$$

$$z_m = z_m^{(0)} = const, \quad m \leq n/2 - j.$$

Верхний индекс  $(j, k)$  или  $(j, i)$  означает:  $j$  – номер приближения,  $k$  или  $i$  – номер шага на этом приближении.

Знак добавки  $\Delta z$  выбирается в соответствии со следующим правилом:

– если выполняется одно из соотношений

$$M_m^{max} < 0 \quad \text{или} \quad 0 < M_m^{max} < M_{m+1}^{max},$$

то  $z_m$  нужно увеличивать; если не выполняется ни одно из этих условий,  $z_m$  нужно уменьшать;

– если  $M_{n/2}^{max} < |M_{n/2}^{on}|$ , то  $z_{n/2}$

нужно увеличивать, иначе – уменьшать.

Изменяем далее переменные пошагово по сформулированному правилу (т. е. прибавляя или отнимая  $\Delta z$ ) до одновременного выполнения условий:

$$M_{n/2}^{max} \approx |M_{n/2}^{on}| \quad \text{и} \quad M_m^{max} \approx M_{m+1}^{max}$$

( $m = n/2 - j + 1, \dots, n/2 - 1$ ), т. е. когда

$$\left(M_{n/2}^{max} - |M_{n/2}^{on}|\right) \quad \text{и} \quad \left(M_m^{max} - M_{m+1}^{max}\right)$$

( $m = n/2 - j + 1, \dots, n/2 - 1$ ) на двух соседних шагах имеют разные знаки.

Соответствующие значения переменных после  $j$ -го приближения оптимизации равны

$$\left(z_1^{(0)}, \dots, z_{n/2-j}^0, z_{n/2-j+1}^{(j)}, \dots, z_{n/2}^{(j)}\right).$$

Аналогичным образом варьируем все  $z_j$  ( $j = 1, \dots, n/2$ ), совершая при этом  $n/2$  приближений.

В результате получим оптимальные значения  $(z_1^{(n/2)}, \dots, z_{n/2}^{(n/2)})$ .

### Алгоритм оптимизации балки кусочно-постоянного сечения

Алгоритм оптимизации балочного элемента этого подвида отличается от алгоритма балочного элемента с постоянным сечением критерием оптимизации (см. формулы (17), (18)) и правилами, по которым пересчитываются переменные  $z$ , начиная со второго приближения.

Правила расчетов на 0-м и 1-м приближениях оптимизации не изменяются.

*Приближение  $j$ .* На  $j$ -м знак добавки  $\Delta z$  выбирается в соответствии со следующим правилом:

– если выполняется одно из соотношений

$$M_m^{max} < 0 \quad \text{или} \quad 0 < M_m^{max} < |M_m^{on}|,$$

$$m = n/2 - j + 1, \dots, n/2 - 1,$$

то  $z_m$  нужно увеличивать; если не выполняется ни одно из этих условий,  $z_m$  нужно уменьшать;

– если  $M_{n/2}^{max} < |M_{n/2}^{on}|$ , то  $z_{n/2}$  нужно

увеличивать, а если  $M_{n/2}^{max} > |M_{n/2}^{on}|$  – уменьшать.

Изменяем далее переменные пошагово по сформулированному правилу (т. е. прибавляя или отнимая  $\Delta z$ ) до одновременного выполнения условий:

$$M_{n/2}^{max} \approx |M_{n/2}^{on}| \quad \text{и} \quad M_m^{max} \approx |M_m^{on}|$$

( $m = n/2 - j + 1, \dots, n/2 - 1$ ), т. е. когда

$$\left(M_{n/2}^{max} - |M_{n/2}^{on}|\right) \quad \text{и} \quad \left(M_m^{max} - |M_m^{on}|\right)$$

на двух соседних шагах имеют разные знаки.

Соответствующие значения переменных после  $j$ -го приближения равны

$$\left(z_1^{(0)}, \dots, z_{n/2-j}^0, z_{n/2-j+1}^{(j)}, \dots, z_{n/2}^{(j)}\right).$$

Аналогичным образом варьируем все  $z_j$  ( $j = 1, \dots, n/2$ ), совершая при этом  $n/2$  приближений.

### Оптимизация стрелы шпренгеля

Если узлы шпренгеля лежат на теоретической кривой, очерченной по квадратной параболе, то опорный и максимальный изгибающие моменты не зависят от стрелы  $f$ . Это видно из выражений (20). Значит, и размеры панелей  $z_j$  не изменяются при изменении  $f$ .

Поэтому можно определять оптимальное значение стрелы  $f$ , считая размеры панелей постоянными и равными уже определенным оптимальным значениям  $z_1^{(n/2)}, \dots, z_{n/2}^{(n/2)}$ . Для этого нужно составить и решить уравнение с одним неизвестным:

$$\partial V / \partial f = 0. \quad (22)$$

Согласно формуле (14), это уравнение имеет вид

$$\frac{\partial V}{\partial f} = \frac{\partial V^{(b)}}{\partial f} + 2 \sum_{j=1}^{n/2-1} \frac{\partial V_j^{(c)}}{\partial f} + \frac{\partial V_{n/2}^{(c)}}{\partial f} + 2 \sum_{j=1}^{n/2} \frac{\partial V_j^{(u)}}{\partial f} + \frac{\partial V_{n/2+1}^{(u)}}{\partial f} = 0. \quad (23)$$

Все производные в уравнении (23) кратны множителю  $K = ql/2mR_y$ , на который можно сократить обе части уравнения. Выражения для производных имеют вид:

– для балочного элемента из формулы (10)

$$\frac{1}{K} \frac{\partial V_b}{\partial f} = - \frac{l^4}{16 f^2 x_{n/2} (l - x_{n/2})}; \quad (24)$$

очевидно, эта формула справедлива в случае постоянного и кусочно-постоянного сечения;

– для стоек, согласно формулам (11), (12)

$$\frac{1}{K} \frac{\partial V_j^{(c)}}{\partial f} = \frac{x_j (l - x_j) (x_{j+1} - x_{j-1})}{l x_{n/2} (l - x_{n/2})} \frac{1}{\varphi_j^2} \left( \varphi_j - f \frac{\partial \varphi_j}{\partial f} \right), \quad j = 1, n/2 - 1; \quad (25)$$

$$\frac{1}{K} \frac{\partial V_{n/2}^{(c)}}{\partial f} = \frac{l - x_{n/2} - x_{n/2-1}}{l} \frac{1}{\varphi_{n/2}^2} \left( \varphi_{n/2} - f \frac{\partial \varphi_{n/2}}{\partial f} \right); \quad (26)$$

– для элементов нижнего пояса, согласно формуле (13),

$$\frac{1}{K} \frac{\partial V_{n/2+1}^{(u)}}{\partial f} = - \frac{l^2}{16 f^2 x_{n/2} (l - x_{n/2})} (l - 2x_{n/2}); \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} \frac{\partial V_j^{(u)}}{\partial f} = & - \frac{l^3}{16 f (x_j - x_{j-1}) x_{n/2} (l - x_{n/2})} \times \\ & \times \left\langle - \frac{1}{f} \left\{ \frac{16 f^2}{l^4} [x_j (l - x_j) - x_{j-1} (l - x_{j-1})]^2 + (x_j - x_{j-1})^2 \right\} + \right. \\ & \left. + \frac{32 f}{l^4} [x_j (l - x_j) - x_{j-1} (l - x_{j-1})]^2 \right\rangle, \quad j = 1, \dots, n/2. \end{aligned} \quad (28)$$

Подставив в уравнение (23) решим его, например, методом выражения для производных (24) – (28), половинного деления.

**Результаты оптимизации шпренгельной балки**

В соответствии со сформулированным алгоритмом, была численно решена задача оптимизации шпренгельной балки с тремя стойками ( $n = 6$ ), пролет балки  $l = 24$  м; начальное значение стрелы  $f = 3,6$  м; интенсивность распределенной нагрузки  $q = 6$  т/м; материал балки – сталь (расчетное сопротивление  $mR_y = 2000$  кг/см<sup>2</sup>). Сечение балочного элемента – прямоугольное с соотношением размеров высоты и ширины  $h/b = 5$ ; сечение стоек и элементов нижнего пояса – кольцевое с диаметром  $D$  и толщиной стенки  $0,025 D$ .

В предположении, что сечение балочного элемента постоянно, получены значения пролетов  $z_1 = 3,11$  м,  $z_2 = 3,6$  м,  $z_3 = 3,88$  м. При этом объем балки  $V = 497625,2$  см<sup>3</sup>. Для случая кусочно-постоянного сечения получено  $z_1 = 2,34$  м,  $z_2 = 3,68$  м,  $z_3 = 4,38$  м. Значение объема  $V = 36492632$  см<sup>3</sup>, что на 26,7 % меньше объема балки постоянного сечения.

При найденных ранее оптимальных значениях панелей получены оптимальная стрела и объем:

– для балочного элемента постоянного сечения

$$f = 6,55 \text{ м}, V = 428425,4 \text{ см}^3,$$

что меньше объема при оптимальных значениях панелей и начальном значении стрелы ( $f = 3,6$  м) на 14 %;

– для балочного элемента кусочно-постоянного сечения

$$f = 6,71 \text{ м}, V = 315924,6 \text{ см}^3,$$

что меньше объема балки при оптимальных значениях панелей и начальном значении стрелы на 13,4 % и меньше объема балки с постоянным сечением и оптимальной в случае постоянного сечения стрелой на 26,3 %.

**Выводы.** Исследование свойств функции объема шпренгельной балки показало, что величина объема не может быть принята в качестве целевой функции при оптимизации, т. к. является разрывной. Поэтому классический метод нахождения оптимального решения оказывается неприемлемым.

В работе предложен метод и алгоритм оптимизации, основанный на использовании конструктивных особенностей шпренгельной балки и требующий минимизации возникающих изгибающих моментов.

Показано, что в случае постоянной распределенной нагрузки расположения узлов нижнего пояса на веревочной кривой можно определять оптимальное значение стрелы при постоянных значениях панелей. На основании предложенного алгоритма проведены численные оценки размеров шпренгельной балки заданных размеров. Показано, что предложенный метод обеспечивает минимизацию объема балки (примерно на 39 % по сравнению с балкой с одинаковыми панелями), причем объем в случае кусочно-постоянного сечения балочного элемента существенно меньше объема в случае постоянного сечения (примерно на 27 %). Для заданной балки получено оптимальное значение стрелы, которое уменьшает объем балки еще примерно на 14 %.

**Список использованных источников**

1. Виноградов, А. И. Проблема оптимального проектирования в строительной механике [Текст] / А.И Виноградов. – Харьков: Вища школа, 1973. – 168 с.

2. Лазарев, И. Б. Математические методы оптимального проектирования конструкций [Текст] / И.Б. Лазарев. – Новосибирск: НИИЖТ, 1974. – 191 с.
3. Китов, Ю. П. Влияние параметров проектирования на оптимальность конструкции стальных балок [Текст] / Ю.П. Китов, Г.Л. Ватуля // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 125. – С. 24-33.
4. Китов, Ю. П. Некоторые соображения о критериях оптимальности [Текст] / Ю.П. Китов, Г.Л. Ватуля, М.А. Веревичева // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 143. – С. 124-131.
5. Клюев, С. В. Оптимальное проектирование строительных конструкций на основе эволюционных и генетических алгоритмов [Текст] / С.В. Клюев, А.В. Клюев. – Lambert, 2011. – 128 с.
6. Чихладзе, Е.Д. Спрощена діаграма граничних станів сталобетонного елемента в задачах оптимізації стержневих конструкції [Текст] / Е.Д. Чихладзе, М.Г. Черненко // Зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2003. – Вип. 59. – Кн. 1. – С. 310 – 317.
7. Farzin Aminifar. Optimal Design of Truss Structures via an Augmented Genetic Algorithm [Text] / Farzin Aminifar, Farrokh Aminifar, Daryoush Nazarpour // Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences. – Vol. 37 (2013) – p. 56 – 68.
8. Dimou C. K. Reliability-Based Optimal Design of Truss Structures Using Particle Swarm Optimization [Text] / С. К. Dimou, V. К. Koumousis // Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE. – Vol. 2/3 (2009) – p. 100 – 109.
9. Основы расчета и проектирования комбинированных и сталобетонных конструкций [Текст] / Э.Д. Чихладзе, Г.Л. Ватуля, Ю.П. Китов и др.; под ред. Э.Д. Чихладзе. – К.: Транспорт Украины, 2006. – 136 с.
10. Китов, Ю.П. Определение частот и периодов собственных колебаний комбинированных конструкций [Текст] / Ю.П. Китов, Г.Л. Ватуля // Теорія і практика будівництва: вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – Вип. 662.–С. 225-229.
11. Фесик, С.П. Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / С.П. Фесик. – К.: Будівельник, 1982. – 230 с.

---

Ватуля Глеб Леонідович, д-р техн. наук, доцент, заведувач кафедри будівельної механіки і гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-70. E-mail: vatulya@kart.edu.ua.

Кітов Юрій Петрович, канд. техн. наук, доцент, професор кафедри будівельної механіки і гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-70.

Веревичева Марина Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки і гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-70.

Сінчук Софія Димитріївна, аспірант кафедри будівельної механіки і гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-70.

Glib Vatulia, DSc, Associated Professor, Head of Building Mechanics and Hydraulics Department. Tel. (057) 730-10-70.

Yurij Kitov, PhD, Associated Professor, Professor of Building Mechanics and Hydraulics Department. Tel. (057) 730-1070

Marina Verevicheva, PhD, Associated Professor, Associated Professor of Building Mechanics and Hydraulics Department. Tel. (057) 730-10-70.

Sofia Sinchuk, Post Graduate Student of Building Mechanics and Hydraulics Department. Tel. (057) 730-10-70.

Стаття прийнята 18.04.2016 р.

УДК 621.391:681.518

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИХІДНОГО СТРУМУ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ СИСТЕМИ АЛСН

Кандидати техн. наук О. М. Прогонний, О. Є. Зінченко,  
студенти Д. В. Сапова, В. В. Волошин, Ж. А. Болдырева

## АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО ТОКА КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ АЛСН

Кандидаты техн. наук А. Н. Прогонный, Е. Е. Зинченко,  
студенты Д. В. Сапова, В. В. Волошин, Ж. А. Болдырева

## A MATHEMATICAL MODELING OF A CAB SIGNALING SYSTEM OUTPUT CURRENT: A MODERN STATE ANALYSIS

Cand. of tehn. sciences A. Progonniy, E. Zinchenko,  
students D. Sapova, V. Voloshin, Zh. Boldyreva

*Розглянуто існуючі математичні моделі часової залежності струму рухомого шунта, накладеного на рейкову лінію в системі автоматичної локомотивної сигналізації неперервного типу. Моделі класифіковано за підходами, використаними при описанні рейкового кола. Визначено явні та неявні математичні та фізичні припущення, прийняті при побудові цих моделей. Подано оцінку ступеню прийнятності кожної з моделей з точки зору інженерної практики.*

**Ключові слова:** рейкове коло, струм шунта, математична модель, частотний підхід, часовий підхід.

*Рассмотрены существующие математические модели временной зависимости тока движущегося шунта, наложенного на рельсовую линию в системе автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа. Модели классифицированы по подходам, использованным при описании рельсовой цепи. Определены явные и неявные математические и физические допущения, принятые при построении этих моделей. Дана оценка степени приемлемости каждой из моделей с точки зрения инженерной практики.*

**Ключевые слова:** рельсовая цепь, ток шунта, математическая модель, частотный подход, временной подход.

*Existing mathematical models of a time-domain dependency of a moving shunt current in a cab signaling system are considered. These models are classified on the base of approaches used for a rail circuit description. An explicit and non-explicit assumptions made during the models building are revealed. A degree of acceptability for every model is evaluated from the engineering point of view.*

**Keywords:** rail circuit, shunt current, mathematical model, frequency-domain approach, time-domain approach.

**Вступ.** Системи автоматичної типу (АЛСН) є важливою складовою локомотивної сигналізації неперервного підтримки безпечного руху поїздів. При



цьому пропускна спроможність і достовірність передачі повідомлень в існуючих системах АЛСН є недостатньо високими [1]. Тому є актуальною задача вдосконалення цих систем.

**Аналіз новітніх досліджень та публікацій.** Вихідний струм каналу передачі сигналу системи АЛСН утворений як сигнальними, так і заводовими компонентами. Робота [1] висвітлює загальну структуру даного струму та містить опис основних завод. У роботах [2, 3] розглянуто спотворення сигналу, обумовлені магнітними властивостями рейок, а в роботі [4] розглянуто вплив на сигнал феромагнітних неоднорідностей рейкової колії. Перелічені роботи дають загальну картину співвідношення між сигнальними та заводовими компонентами вихідного струму каналу передачі сигналів АЛСН, однак містять результати переважно експериментального характеру і здебільшого щодо розгляду завод. Набагато більшу увагу сигнальній компоненті та формалізації її описання приділено в роботах [5-8], в яких, власне, й продемонстровано різні підходи до побудови математичної моделі вказаного струму і, зокрема, враховано рух шунта. Нарешті, найбільш загальні підходи до моделювання струмових відгуків лінійних і нелінійних кіл на імпульсні вхідні впливи (базовані на розв'язку систем диференціальних рівнянь або рядах Фур'є) розглянуто в роботах [9-11].

**Об'єкт, мета і задачі дослідження.** Об'єктом дослідження даної роботи виступає процес формування вихідного струму каналу передачі сигналів системи АЛСН.

Метою роботи є порівняльний аналіз існуючих математичних моделей, які побудовані при вивченні часової залежності струму шунта, що замикає рейкове коло, водночас поступально рухаючись вздовж нього, і з'ясування умов існування та величин розбіжностей між ними.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1) чітко розділити моделі за підходами, використаними при описанні рейкового кола;

2) визначити явні та неявні математичні та фізичні припущення, прийняті при побудові вказаних моделей;

3) дати оцінку ступеню прийнятності кожної з моделей з точки зору інженерної практики.

**Основна частина.** *Результати досліджень при застосуванні частотного підходу.* В роботі [6] для віднаходження часової залежності струму шунта для ділянки рейкового кола побудовано комплексну передатну функцію (КПФ) за струмом:

$$\underline{K}_I(\omega) = \frac{1}{(\underline{C}R_{III} + \underline{D})\underline{Z}_r + \underline{A}R_{III} + \underline{B}}, \quad (1)$$

де  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  є А-параметрами ділянки;  $R_{III}$  – опір шунта;  $\underline{Z}_r$  – внутрішній опір генератора сигналу.

Надалі авторами роботи [6] показано, що за підстановки первинних параметрів електричної лінії, опорів генератора, навантаження та шунта цей вираз можна подати у такій загальній формі:

$$\underline{K}_I(\omega) = \frac{1}{-a\omega^2 + jb\omega + c}, \quad (2)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти, що залежать від параметрів кола та від координати шунта;  $j$  – уявна одиниця.

На базі цього подання отриманий проміжний вираз для спектральної щільності струму шунта за умови, що від часу залежить лише координата його розташування вздовж рейкової лінії. Для отримання кінцевого виразу необхідно було виконати пряме перетворення Фур'є від добутку (2) із спектром прямокутного радіоімпульсу. Неможливість точного інтегрування примусила авторів роботи [6] застосувати апроксимації виразів, що

стоять під знаками інтегралів. Але отриманий ними струм шунта як функція часу все одно стався дуже громіздким і, виходячи з цього, мало корисним для інженерного застосування.

У роботі [5] авторами було враховано слабкість залежності від квадрата частоти в КПФ за струмом вираз (2) і внаслідок цього отримано такий вираз для неї:

$$\underline{K}_I(\omega) = \frac{1}{j\omega b + c} \quad (3)$$

Викладена для попереднього випадку методика визначення виразу для струму

$$\begin{aligned} e_r(t) &= 1(t)E_{Im} \sin(\omega_0 t + \varphi_E) - 1(t - \tau_H)E_{Im} \sin(\omega_0 t + \varphi_E) = \\ &= e_1(t) - e_2(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Тут  $1(t)$  є позначенням одиничної ступінчастої функції;  $E_{Im}$ ,  $\omega_0$  та  $\varphi_E$  – відповідно амплітуда, частота і початкова фаза сигнального імпульсу.

Знайшовши спектральну щільність кожного з доданків виразу (4), автори

$$i_{ш}(t) = \frac{E_{Im}}{\sqrt{c^2 + (\omega_0 b)^2}} \Lambda_1(t) \cdot 1(t) - \frac{E_{Im}}{\sqrt{c^2 + (\omega_0 b)^2}} \Lambda_2(t) \cdot 1(t - \tau_H), \quad (5)$$

де  $\Lambda_1(t)$  та  $\Lambda_2(t)$  - деякі допоміжні функції.

Як у роботі [5], так і в роботі [6] автори спиралися на припущення про повільність зміни в часі параметрів комплексної передатної функції за струмом. Такий самий підхід застосований і авторами роботи [7], де подані графіки зміни модуля цієї функції в часі на кількох частотах. Внаслідок цього отримані ними формули для струму шунта як функції часу можна застосовувати лише при повільному русі поїздів, що скоріше є придатним для аналізу систем АЛСН при руху на станціях.

*Результати досліджень при застосуванні часового підходу.* Інший

шунта в цій ситуації теж виявилася непридатною з тих самих причин. Однак автори роботи [5] на підставі аналізу виразу (3) і з урахуванням руху шунта дійшли висновку, що за даних спрощуючих припущень розрахунок залежності  $i_{ш}(t)$  – це розрахунок струму, викликаного подачею прямокутного радіоімпульсу протяжністю  $\tau_H$  сигнальної електрорушійної сили (ЕРС)  $e_r(t)$  на послідовне  $RL$ -коло із змінними  $R(t)$  та  $L(t)$ . Цей радіоімпульс можна зобразити як різницю двох функцій:

роботи [5] після цього віднайшли струм шунта за допомогою зворотного перетворення Фур'є. Це призвело до отримання математичного виразу для струму шунта в більш наочній формі, ніж у попередньому випадку:

підхід до отримання математичного виразу, що описує струм шунта, був використаний автором роботи [8]. Він застосував тлумачення КПФ (3) як такої, що описує коло, утворене в результаті послідовного з'єднання резистора та котушки індуктивності, параметри  $R_{л}$  та  $L_{л}$  яких змінюються в часі внаслідок руху шунта. В цій роботі розраховано наслідки підключення синусоїдальної ЕРС до такого кола. Автор спочатку прийняв до уваги, що розглянуте коло є параметричним, і в ньому первинною величиною в парі з резистором є не індуктивність, а її потокозчеплення  $\Psi(t)$ . Після визначення цього виписано диференціальне рівняння кола у вигляді

$$\frac{d\Psi(t)}{dt} + i(t)R_{II}(t) = E_{II} \sin(\omega_0 t + \varphi_E) . \quad (6)$$

Оскільки  $\Psi(t) = L_{II}(t)i(t)$ , то рівняння (6) набуває такого остаточного вигляду:

$$L_{II}(t) \frac{di(t)}{dt} + \left[ \frac{dL_{II}(t)}{dt} + R_{II}(t) \right] i(t) = E_{II} \sin(\omega_0 t + \varphi_E) . \quad (7)$$

Припущення про постійну швидкість  $V$  руху шунта призводить до таких часових залежностей індуктивності та опору розрахованого кола:

$$L_{II}(t) = L_a - k_L \cdot V \cdot t, \\ R_{II}(t) = R_a - k_R \cdot V \cdot t,$$

де  $L_a$  та  $R_a$  – початкові величини параметрів у перерізі рейкової лінії, де шунт розташований у момент подачі сигнального імпульсу в лінію;  $k_L$  та  $k_R$  – коефіцієнти пропорційності.

В ході аналітичного розв’язання рівняння (7) автор роботи [8] зіткнувся з

необхідністю узяття інтеграла  $\int_0^t \sin(\omega_0 t - \varphi_E) \cdot (L_a - k_L V t)^{\beta-1} \cdot e^{\alpha t} dt$  і ви-  
мушений був скористатися наближеною рівністю

$$(1-x)^y \approx 1 - x y . \quad (8)$$

Це еквівалентно припущенню, що  $\frac{k_L V t}{L_a} \ll 1$ . Тому наведений ним як результат роботи вираз для шуканого струму

$$i(t) = \frac{E_m}{\left(1 - \frac{k_L V}{L_a} t\right)^\beta \cdot \sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} \cdot L_a} \cdot \left[ \sin(\omega_0 t + \varphi_E + \psi) - e^{-\alpha t} \cdot \sin(\varphi_E + \psi) \right] - \\ - \frac{E_m k_L V \cdot (\beta - 1)}{\left(1 - \frac{k_L V}{L_a} t\right)^\beta \cdot L_a^2} \cdot \left[ \frac{t}{\sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2}} \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_E + \psi) - \frac{1}{\omega_0^2 + \alpha^2} \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_E + 2\psi) + \frac{e^{-\alpha t}}{\omega_0^2 + \alpha^2} \cdot \sin(\varphi_E + 2\psi) \right] \quad (9)$$

є наближеним і відтворює з прийнятною точністю, як вказує автор, лише ділянку кривої струму в районі переднього фронту імпульсу.

Числове розв’язання рівняння для струму шунта. Для з’ясування ступеня практичної придатності поданих вище формул для часової залежності струму шунта мінімально необхідним є порівняння цих результатів із заздалегідь точними

результатами, отриманими хоча б для кількох конкретних сполучень параметрів піддослідного електричного кола. Як такі результати візьмемо результати числового розв’язання диференціального рівняння (7), маючи при цьому на увазі, що їх точність визначена точністю використаного методу розв’язання диференціальних рівнянь. Саме такі методи покладені в основу існуючих математичних середовищ. У ході

проведення цієї роботи було виконано розрахунок за формулою (9) при сполученнях параметрів рейкового кола, за яких наближена рівність (8) виконується з похибкою не більше 20%. Далі було обчислено абсолютну величину різниці між результатами (9) та розв'язком, обчисленим числовим розрахунком та прийнятим за точний. На рис. 1-6 наведені графіки часових залежностей точних та наближених згідно з виразом (9) значень струму, а також графіки абсолютних різниць між наближеними та точними значеннями. Можна зробити висновок, що прийнятна точність апроксимації зберігається в межах (0...0,002) с. За протяжності сигнального

імпульсу системи АЛСН близько 0,3 с цей проміжок відповідає часовій зоні коло фронту імпульсу. Далі точність апроксимації швидко погіршується вздовж імпульсу. Ці результати кількісно підтверджують зроблений у роботі [8] висновок про обмеження часової ділянки апроксимації і водночас настановлюють на думку, чи не занадто короткою є ця ділянка. Однак за браку інших аналітичних описань часової залежності сигнального струму системи АЛСН вираз для струму, отриманий в роботі [8], можна використовувати при розрахунках з урахуванням відповідних обмежень.

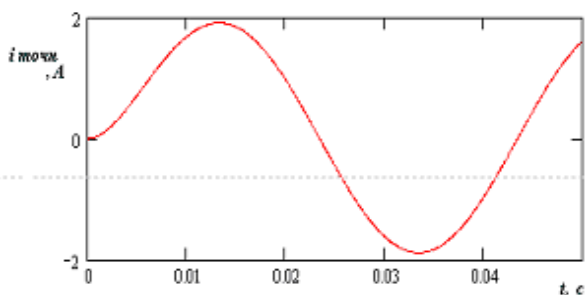


Рис. 1. Точний струм при  $\varphi_E = 0^\circ$

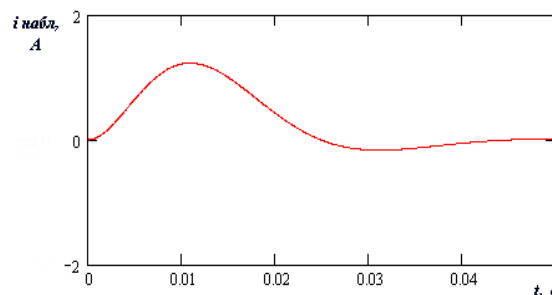


Рис. 2. Струм згідно з виразом (9) при  $\varphi_E = 0^\circ$

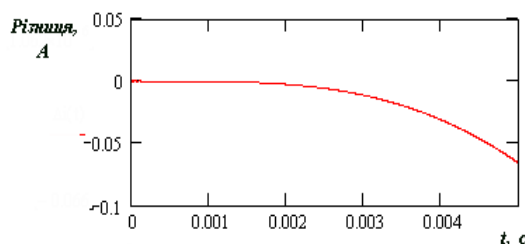


Рис. 3. Абсолютна похибка розрахунку при  $\varphi_E = 0^\circ$

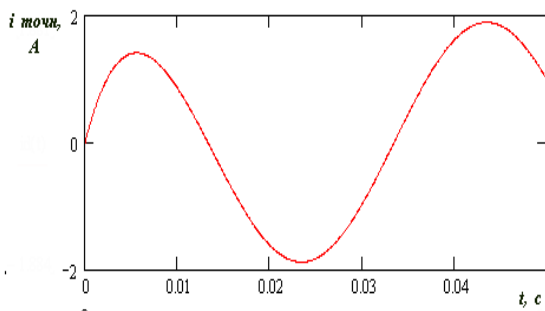


Рис. 4. Точний струм при  $\varphi_E = 90^\circ$

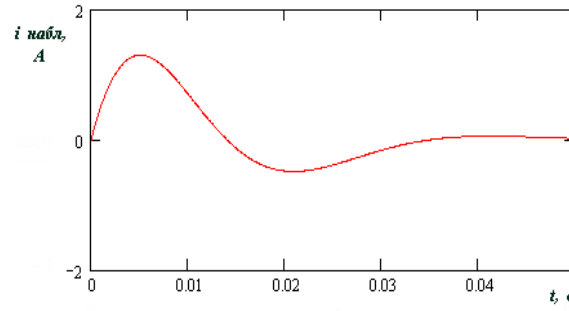
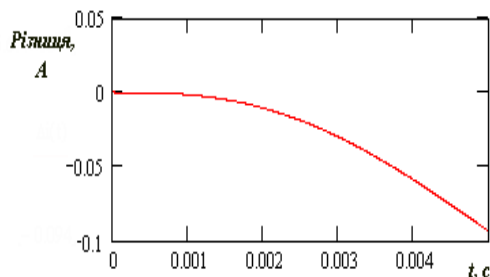


Рис. 5. Струм згідно з виразом (9) при  $\varphi_E = 90^\circ$

Рис. 6. Абсолютна похибка розрахунку при  $\varphi_E = 90^\circ$ 

**Висновки.** Порівняння існуючих методів математичного моделювання сигнального струму системи АЛСН за умови руху шунтувальної перемички показало, що деякі з них придатні лише за низьких швидкостей руху поїзда, а метод, розроблений у роботі [8] хронологічно останнім, придатний у широкому діапазоні швидкостей руху поїзда, але лише при

описанні початкового фрагмента імпульсу. Однак, на відміну від попередніх методів, він має резерв для розширення меж свого застосування. Цим резервом є використання більш точних апроксимацій замість виразу (8), наприклад, розвиненням лівої частини цього виразу в ряд із більшою кількістю членів.

#### Список використаних джерел

1. Бабаєв, М. М. Аналіз існуючих вітчизняних і закордонних систем АЛС на залізничному транспорті [Текст] / М. М. Бабаєв, В. О. Сотник // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 116. – С. 120-127.
2. Augutis, V. Measurements and Processing of Signals used in a Cab Signaling System [Text] / V. Augutis, D. Gailius, R. Misevicius, M. Juraska // Electronics and Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 18. – № 9. – P. 27-30.
3. Леушин, В. Б. Аналіз причин сбоев в системі АЛСН [Текст] / В. Б. Леушин, К. Э. Блачев, Р. Р. Юсупов // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 4. – С. 20-25.
4. Ананьєва, О. М. Вплив неоднорідностей рейкової лінії на приймання сигналів АЛСН [Текст] / О. М. Ананьєва, В. О. Сотник // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 124. – С. 77-83.
5. Ананьєва, О. М. Математична модель вхідного сигнального струму локомотивного приймача числових кодів АЛСН [Текст] / О. М. Ананьєва, В. О. Сотник, Ю. В. Соколов // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – Вип. 26. – С. 67-70.
6. Часові характеристики струму шунта та електрорушійної сили локомотивних котушок системи АЛСН [Текст] / О. М. Ананьєва, М. Г. Давиденко, В. О. Сотник, М. М. Бабаєв // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 127. – С. 56-78.
7. Ананьєва, О. М. Временные зависимости сигнального тока локомотивного приемника числовых кодов АЛСН [Текст] / О. М. Ананьєва, М. Г. Давиденко // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 154. – С. 127-136.
8. Блиндюк, В. С. Дослідження структури вихідного струму каналу передачі сигналів системи АЛСН [Текст] / В. С. Блиндюк // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – №5/1 (25). – С. 47-50.

9. Maffezzoni, P. Time-Domain Simulation of Nonlinear Circuits Through Implicit Runge-Kutta Methods [Text]/ P.Maffezzoni, L.Codecasa, D.D'Amore// IEEE Transactions on Circuits and Systems I. – 2007. – V.54. - №2. – P.391-400.

10. McSharry, P.E. A Dynamical Model for Generating Synthetic Electrocardiogram Signals [Text] / P.E. McSharry, G.D. Clifford, L. Tarassenko, L.A. Smith // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2003. – V.50. - №3. – P.289-294.

11. Chen, G. An RLC Interconnect Model Based on Fourier Analysis [Text] / G. Chen, E.G.Friedman // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2005. – V.24. - №2. – P.170-183.

Рецензент д-р техн наук, професор М.М. Бабаєв

---

Прогонний Олексій Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри електротехніки та електричних машин, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-08.

E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Зінченко Олена Євгенівна, канд. техн. наук, доцент кафедри електротехніки та електричних машин, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-96.

E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Сапова Дарина Вікторівна, студентка Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (066)503-27-41. E-mail: missis.sapova2012@mail.ru.

Волошин Владислав Вікторович, студент Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (095)560-39-76. E-mail: animacompany1@gmail.com.

Болдирева Жанна Анатоліївна, студентка Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (098)863-25-07. E-mail: nevdovina.z@mail.ru.

Progonniy Alexey, cand. of tehn. Sciences, Associate Professor, chair of Electronics, Electrical Machines of Ukrainian State University of railway transport. Tel.: (057) 730-10-08. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Zinchenko Elena, cand. of tehn. Sciences, chair of Electronics, Electrical Machines of Ukrainian State University of railway transport. Tel.: (057) 730-19-96. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Sapova Darina, student, Ukrainian State University of railway transport. Tel.: (066)503-27-41. E-mail: missis.sapova2012@mail.ru.

Voloshin Vladislav, student, Ukrainian State University of railway transport. Tel.: (095)560-39-76. E-mail: animacompany1@gmail.com.

Boldyreva Zhanna, student, Ukrainian State University of railway transport. Tel.: (098)863-25-07. E-mail: nevdovina.z@mail.ru.

Стаття прийнята 27.04.2016 р.

УДК 625.143.472

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЖОРСТКОСТІ ПІДРЕЙКОВИХ ПРОКЛАДОК ДЛЯ ПРОМІЖНИХ РЕЙКОВИХ СКРІПЛЕНЬ ТИПУ "МЕТРО"**

Асп. А. С. Малішевська

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТКОСТИ ПОДРЕЛЬСОВЫХ ПРОКЛАДОК ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ ТИПА "МЕТРО"**

Асп. А. С. Малишевская

**EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF THE STIFFNESS OF RAIL PADS FOR RAIL FASTENINGS SUCH AS "METRO"**

Postgraduate student A. S. Malishewska

*Для виконання розрахунків сил взаємодії колії та рухомого складу і розрахунків елементів верхньої будови колії на міцність необхідно, зокрема, знати параметри просторової жорсткості підрейкової основи. Якщо для умов магістральних залізниць ці параметри відомі, то для колій метрополітенів це питання потребує додаткових досліджень. У даній статті викладено порядок проведення і результати експериментальних досліджень динамічної і статичної жорсткостей підрейкових прокладок для рейкового скріплення типу "Метро".*

**Ключові слова:** підрейкова прокладка, деформація, випробування, скріплення, жорсткість, навантаження, зсув, стиснення.

*Для выполнения расчетов сил взаимодействия пути и подвижного состава и расчетов элементов верхнего строения пути на прочность необходимо, в частности, знать параметры пространственной жесткости подрельсового основания. Если для условий магистральных железных дорог эти параметры известны, то для путей метрополитенов этот вопрос требует дополнительных исследований. В данной статье изложены порядок проведения и результаты экспериментальных исследований динамической и статической жесткостей подрельсовых прокладок для рельсового скрепления типа "Метро".*

**Ключевые слова:** подрельсовая прокладка, деформация, испытания, скрепления, жесткость, нагрузка, смещение, сжатие.

*Stiffness is an important characteristic, without which it is not possible to ensure reliable operation of the elements of the upper structure of railway track. To perform the calculations of forces of interaction paths and rolling stock, and calculation of the elements of strength necessary, in particular, know the parameters of the spatial stiffness of the rail Foundation. If the conditions of trunk Railways, usually known, for the paths of subways, this question requires additional research. In our article we propose a method of finding the stiffness parekowhai strip for fastening type "Metro".*

**Keywords:** rail strip, deformation, test, bond, stiffness, load, shift, compression.

**Вступ.** Жорсткість є важливою характеристикою, без врахування якої не

можна забезпечити надійну роботу елементів верхньої будови залізничної колії

(ВБК). У процесі експлуатації будь-якої залізничної колії через недостатню пружність рейкових опор виникають залишкові деформації, що зменшує ресурс роботи конструкції ВБК і може призвести до її відмови. В той же час залишкова жорсткість збільшує рівень віброприскорень, що шкідливо впливає не тільки на колію, але і на рухомий склад, а в умовах метрополітену ще і на тунельне обладнання, і на міські будівлі, які розташовані поблизу траси метрополітену.

Очевидно, що жорсткість залізничної колії залежить від жорсткостей елементів ВБК. Зараз на метрополітенах України найпоширенішою є конструкція типової ВБК, яка містить рейки Р50, проміжні скріплення типу "Метро" і дерев'яні шпали, які омонолічені у бетоні. У свою чергу проміжне скріплення типу "Метро" складається з декількох елементів, до яких належать і полімерні підрейкові прокладки.

Через складні процеси, які виникають при навантаженні на підрейкову прокладку, теоретично визначити її жорсткість стає неможливою задачею. Тому для розрахунку жорсткості ВБК зі скріпленням типу "Метро" за відомою розрахунковою схемою [1] необхідно визначити відсутню складову – жорсткість підрейкової прокладки, яка виконана із полімерних матеріалів.

У даній статті пропонується це зробити експериментальними методами.

**Аналіз досліджень і публікацій.** На явищі збільшення жорсткості прокладок скріплень КБ та КПП-5 при динамічному навантаженні наголошувалось багатьма дослідниками. Так, у роботах [2-5] встановлено збільшення жорсткості підрейкових та нашпальних прокладок скріплень типу КБ при динамічному навантаженні на 22-70 %, ніж при статичному навантаженні. В роботах [6-8] для умов колій незагального користування встановлено збільшення динамічної жорсткості таких прокладок до 89 % при різних значеннях навантаження, а також

встановлені залежності горизонтальної поперечної жорсткості підрейкових та нашпальних прокладок скріплень КБ та КПП у процентах від величини стиснення прокладок вертикальними силами. Також були розглянуті іноземні видання [9,10].

Однак у зазначених роботах немає даних про залежність жорсткості підрейкових прокладок метрополітенів від частоти динамічного навантаження у діапазоні реальних коливань при русі рухомого складу (1-11 Гц). Не наведені дані про жорсткість прокладок на зсув під дією горизонтальних поперечних сил.

**Мета.** Експериментально визначити:

- жорсткість зсуву підрейкових прокладок для скріплення типу "Метро" залежно від статичних навантажень ( $u_z^{ст}$  – статичну жорсткість прокладок) і від динамічних навантажень ( $u_z^{дин}$  – динамічну жорсткість прокладок);

- залежність зміни динамічної жорсткості прокладок від часу в процесі експлуатації.

**Основна частина.** Відомо, що залежність тангенціальних напружень у прокладках від деформації зсуву характеризується законом Гука:

$$\tau = G \frac{\psi}{h}, \quad (1)$$

де  $\tau$  – тангенціальні напруження зсуву, Па;

$\psi$  – деформація зсуву, м;

$h$  – товщина шару гуми або іншого полімеру, м;

$G$  – модуль зсуву, Па.

Після перетворень можна отримати наступний вираз для жорсткості прокладки при зсуві

$$u_y = G \frac{F_{оп}}{h}, \quad (2)$$

де  $u_y$  – жорсткість прокладки при зсуві;

$F_{оп}$  – опорна площа поверхні прокладки, м<sup>2</sup>.

Оскільки в реальних умовах підрейкова прокладка скріплення "Метро"



працює на зсув будучи нерівномірно стислою, за рахунок спільної дії вертикальних  $R_z$  і горизонтальних  $R_y$  сил, величина  $h$  є змінною. Тому треба експериментально визначити залежність жорсткості прокладок при зсуві як функцію величини її стиснення.

Протягом часу відбуваються зміни фізико-хімічних характеристик полімерних матеріалів, у тому числі гуми. Внаслідок цих дій змінюються механічні характеристики прокладок, зокрема збільшується їх жорсткість. Зміни механічних характеристик полімерних прокладок прийнято називати старінням матеріалу. Збільшення жорсткості прокладок скріплення КБ і КПП-5 у процесі експлуатації зазначається в роботах [2-5, 6,7,8].

Таким чином, при плануванні експериментальних досліджень передбачалося визначити статичну і динамічну жорсткість полімерних підрейкових прокладок скріплення "Метро" типів 160 і 195 при стисненні і бічному зсуві одночасно. Крім того, з метою визначення зміни механічних характеристик випробувались прокладки, які були в експлуатації протягом 10 років.

Випробування прокладок при статичному і динамічному навантаженні проводилися на пульсуючому гідравлічному пресі типу УМП-50 (див. рисунок).



Рис. Пристрій для випробування прокладок

Статичні випробування на стиск проводилися під дією навантаження від 0 до 40 кН з постійною швидкістю  $0,2 \frac{\text{кН}}{\text{с}}$  з подальшим розвантаженням.

Інтервали динамічного навантаження при випробуваннях прокладок на стиск і сумісну дію стискних і зсувних сил були прийняті від 20 до 35 кН, що відповідає реальним навантаженням на вузол скріплення метрополітену в реальних умовах.

Навантаження фіксувались на монометрах преса. Динамічні випробування проводилися при частотах пульсуючого навантаження 5,5 та 11 Гц, що відповідає швидкостям проходження осей вагона метро відповідно 35 та  $70 \frac{\text{км}}{\text{год}}$  з відстанню між осями 2,2 метра. Деформації прокладок вимірювались за допомогою відеоцифрової системи, яка була розроблена на кафедрі колії і колійного господарства УкрДУЗТ [6,7,8]. Прокладки випробувались при плюсових температурах 18-20 °С. Перед записом інформації заздалегідь "тренували" прокладки 200-300 пульсацій.

Випробування прокладок проводилися у спеціальному пристрої (див. рисунок), який надає можливість проводити випробування як на дію тільки сил стиску, так і на сумісну дію стискних і зсувних сил. Співвідношення цих сил задавалося кутом нахилу робочої площадки.

При статичних та динамічних навантаженнях випробувалось по 25 прокладок кожного типу. Отримані значення піддавались статистичній обробці з визначенням мінімальних і максимальних середніх значень та середньоквадратичних відхилень. Набуті в результаті цих випробувань значення жорсткостей прокладок  $u_z^{\text{ст}}$ ,  $u_z^{\text{дин}}$  та їх середньоквадратичні відхилення  $S$  наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Жорсткість підрейкових прокладок скріплення "Метро"

Тип прокладки, мм	Статична жорсткість, $\frac{\text{кН}}{\text{м}}$		Динамічна жорсткість, $\frac{\text{кН}}{\text{м}}$			
			Частота навантаження			
	$u_z^{\text{ст}}$	S	5,5 Гц		11 Гц	
$u_z^{\text{дин}}$			S	$u_z^{\text{дин}}$	S	
160	$20,89 \cdot 10^3$	$0,83 \cdot 10^3$	$43,4 \cdot 10^3$	$2,17 \cdot 10^3$	$44,9 \cdot 10^3$	$2,20 \cdot 10^3$
195	$28,88 \cdot 10^3$	$1,25 \cdot 10^3$	$84,8 \cdot 10^3$	$5,05 \cdot 10^3$	$152,2 \cdot 10^3$	$9,13 \cdot 10^3$

На відміну від прокладок скріплень КБ та КПП-5, збільшення динамічної жорсткості підрейкових прокладок скріплення "Метро" складає 2,1-2,15 разу для прокладок типу 160, та 2,93-5,26 разу для прокладок типу 190. Цей факт можна пояснювати тим, що, на відміну від прокладок для скріплень КБ та КПП-5, прокладки скріплення "Метро" не мають рифлень, а жорсткість гумових та полімерних прокладок істотно залежить від коефіцієнта форми.

Крім того, встановлено, що жорсткість прокладок 160 при стисненні практично не залежить від частоти навантаження (різниця не перевищує 3%), але для прокладок типу 195 при зростанні

частоти навантаження від 5,5 до 11 Гц її динамічна жорсткість зростає майже у 2 рази. Можна припустити, що такі зміни обумовлені хімічним складом гуми прокладки.

Випробування прокладок, які були в експлуатації протягом 10 років, дали змогу встановити, що динамічна жорсткість прокладок на стиск збільшилась у середньому на 20% для прокладок типу 160 і на 27% для прокладок типу 190. Припускаючи лінійну залежність зміни жорсткості прокладки при динамічному стисненні від терміну її служби, можна одержати емпіричні залежності, які подані в табл. 2.

Таблиця 2

Залежність зміни жорсткостей прокладок при динамічному стисненні в процесі експлуатації

Тип прокладки	Емпірична залежність, $u_z^{\text{дин}}=f(t) \frac{\text{кН}}{\text{м}}$	Середня помилка апроксимації, %
160	$u_z^{\text{дин}}(t) = u_z^{\text{дин}} + 0,87 \cdot 10^3 t$	4,17
195	$u_z^{\text{дин}}(t) = u_z^{\text{дин}} + 1,54 \cdot 10^3 t$	4,34

Для визначення залежності жорсткості прокладок при зсуві від величини їх стиснення (формула (2)) в установці (див. рисунок) прокладки випробувались при куті нахилу робочої площадки, який встановлювався послідовно рівним 5°, 10°, 15°. Таким чином співвідношення зсувних і стискних навантажень складало 0,09, 0,18 і 0,27.

Залежність жорсткості прокладки при зсуві від величини її стиснення  $\Delta h$  є показовими функціями і були апроксимовані виразами

$$u_z^{\text{дин}} = a + b \cdot \Delta h^c, \quad (3)$$

де  $\Delta h$  – величина стиснення прокладки, м;  $a, b, c$  – емпіричні параметри рівняння.

Ці параметри були визначені за допомогою табличного процесора EXL за даними випробуваннями. Одержані

залежності жорсткості прокладки при зсуві наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Зміни жорсткості прокладки при зсуві від величини стиснення

Тип прокладки	Залежність жорсткості при зсуві, $u_z=f(\Delta h) \frac{\text{кН}}{\text{м}}$	Середня помилка апроксимації, %
160	$43,2 \cdot 10^3 + 367,3 \cdot 10^5 \Delta h^{0,985}$	3,6
195	$51,4 \cdot 10^3 + 1402,3 \cdot 10^5 \Delta h^{0,974}$	4,9

Випробування прокладок, що були в експлуатації, на сумісну дію стискних і зсувних сил дало змогу одержати залежності змін жорсткості прокладок при зсуві від терміну їх роботи в колії. Збіль-

шення таких жорсткостей після 10 років експлуатації склало в середньому 23-34 %.

Застосовуючи лінійний закон зміни цих жорсткостей від терміну служби, були одержані залежності, які подані в табл. 4.

Таблиця 4

Залежність зміни жорсткості прокладки при зсуві від терміну експлуатації

Тип прокладки	Емпірична залежність, $u_y^{\text{дин}}(t)=f(t) \frac{\text{кН}}{\text{м}}$	Середня помилка апроксимації, %
160	$u_y^{\text{дин}}(t)= u_y + 0,26 \cdot 10^4 t$	4,17
195	$u_y^{\text{дин}}(t)= u_y + 0,37 \cdot 10^4 t$	5,22

**Висновки.** Одержані залежності жорсткості підрейкових прокладок для проміжних рейкових скріплень типу "Метро" при зсуві від величини стиснення. Для прокладок типу 160 статична жорсткість становить  $20,89 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$ . Динамічна жорсткість при частоті 5,5 Гц складає  $43,4 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$ , а при 11 Гц –  $44,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$ . Для прокладок типу 195 статична жорсткість –  $28,88 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$ , а при 11 Гц відповідно  $152,2 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$ .

Також випробування прокладок, що були в експлуатації протягом 10 років, визначили, що динамічна жорсткість прокладок на стиск збільшилась у середньому на 20 % для прокладок типу 160 і на 27 % для прокладок типу 190.

Таким чином, у результаті проведення експериментальних робіт, були одержані параметри жорсткості прокладок при їх стисненні і зсуві, а також залежності змін цих жорсткостей під час експлуатації колії.

*Список використаних джерел*

1. Малішевська, А. С. Формування просторової жорсткості рейкових опор метрополітену [Текст] / А. С. Малішевська, Д. А. Фаст // Іваново: Научний мир. – 2015. – Вип. 2, Т. 1. – С. 48-55.
2. Шахунянц, Г.М. Некоторые вопросы исследования работы резиновых прокладок повышенной упругости для пути с железобетонными шпалами [Текст] / Г. М. Шахунянц, А. А. Демидов // Тр. МИИТ. – М.: Транспорт, 1971. – Вип. 354. – С. 24-32.
3. Купцов, В. В. Методики определения жесткости резиновых прокладок-амортизаторов на сжатие [Текст] / В. В. Купцов // Труды ВНИИЖТ. – М., 1979. – № 616. – С. 36-54.
4. Карпущенко, Н. И. Расчет упругих элементов промежуточных рельсовых скреплений [Текст]: монография / Н. И. Карпущенко // Труды НИИЖТ. – М., 1972. – №135. – С. 41-48.
5. Ладыгин, Ю. Н. Лабораторные испытания рельсовых скреплений [Текст] / Ю. Н. Ладыгин, Ю. М. Стойда // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – № 12. – С. 8-12.
6. Даренський, О. М. Експериментальне визначення пружних характеристик прокладок проміжних скріплень КБ [Текст] / О. М. Даренський, В. Г. Вітольберг // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – Вип. 87. – С. 172-178.
7. Даренський, О. М. Просторова жорсткість проміжного скріплення типу КПП-5 [Текст] / О. М. Даренський // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНІИЖТ, 2007. – Вип. 10. – С. 100-109.
8. Даренський, О. М. Експериментальне визначення пружних характеристик елементів проміжного скріплення КПП-5 [Текст] / О. М. Даренський, В. Г. Вітольберг // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНІИЖТ, 2008. – Вип. 13. – С. 139-143.
9. Bogacz R., Czyczula W., Konowrocki R. Influence of sleepers shape and configuration on track-train dynamics [Text] // Shock and Vibration. – 2014. – Т. 2014.
10. Frangopol D. M., Liub M. Structure and infrastructure engineering: Maintenance, management, life-cycle design and performance [Text] // Struct. Infrastruct. Eng. – 2011. – Т. 7. – №. 6. – P. 389-413.

Рецензент д-р техн. наук, професор О. М. Даренський

---

Малішевська Аліна Сергіївна, аспірант кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (093)020-18-43.

Maliszewski Alina Sergeevna, postgraduate student of the Department of road and track facilities of Ukrainian state University of railway transport. Tel.: (093) 020-18-43. E-mail: kttolik@yandex.ua.

Стаття прийнята 27.04.2016 р.

УДК 621.44.3:678-462

**ТЕПЛОВИЙ АКУМУЛЯТОР ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДПУСКОВОЇ І ПІСЛЯПУСКОВОЇ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ ДВИГУНА В УМОВАХ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Канд. техн. наук І. В. Грицук (ХНАДУ),  
старш. наук. співроб. В. С. Вербовський (Інститут газу НАНУ)

**ТЕПЛОВОЙ АККУМУЛЯТОР ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПУСКОВОЙ И ПОСЛЕПУСКОВОЙ ТЕПЛОВОЙ ПОДГОТОВКИ ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Канд. техн. наук И. В. Грицук (ХНАДУ),  
старш. науч. сотруд. В. С. Вербовский (Институт газа НАНУ)

**HEAT ACCUMULATOR PHASE TRANSITION AS A MEANS TO ENHANCE THE PRE-STARTING AND POST-LAUNCH HEAT ENGINE TRAINING IN COLD CONDITIONS**

**Candidate of Technical Science (Ph.D), I. Gritsuk, senior Research Fell, V. Verbovskii**

*У статті подано результати експериментальних і розрахункових досліджень газового двигуна 6Ч 12/14, оснащеного системою прогріву з тепловим акумулятором фазового переходу, у процесі передпускового і післяпускового прогріву охолоджуючої рідини і моторної оливи. Результати оцінки застосування теплового акумулятора підтвердили зменшення часу прогріву, поліпшення паливної економічності і зниження викидів у процесі передпускової і післяпускової теплової підготовки.*

**Ключові слова:** газований двигун, система охолодження, система мащення, тепловий акумулятор фазового переходу, прогрів, паливна економічність, шкідливі викиди.

*В статье представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований газового двигателя 6Ч 12/14, оснащенного системой прогрева с тепловым аккумулятором фазового перехода, в процессе предпускового и послепускового прогрева охлаждающей жидкости и моторного масла. Результаты оценки применения теплового аккумулятора подтвердили уменьшение времени прогрева, улучшение топливной экономичности и снижение выбросов в процессе предпусковой и послепусковой тепловой подготовки.*

**Ключевые слова:** газовой двигатель, система охлаждения, система смазки, тепловой аккумулятор фазового перехода, прогрев, топливная экономичность, вредные выбросы.

*We study the heat storage as a means of increasing the efficiency of engine start-up at low temperatures. The heat accumulator consists of heating circuits and heat extraction and heat accumulating phase change material. An experimental version of the thermal battery systems for the study of the heat accumulator and tested by the time of charging and discharging the heat accumulator at different input parameters. The experimental materials that convincingly demonstrate the feasibility of using heat storage in the cooling system of internal combustion engine to increase its temperature before starting. The article presents the results of experimental and theoretical investigations of the gas engine 6FC 12/14, equipped with a system to warm the battery thermal phase transition, in the process of pre-launch and postheating warm the coolant and engine oil. The results of evaluation of the application of the thermal battery is warm-up time*

*reduction, improved fuel economy and reduced emissions during the pre-launch and post-launch preparation of heat.*

**Key words:** *gas engine, cooling system, lubrication system, heat storage phase transition, heating, fuel economy, emissions.*

**Вступ.** Розвиток двигунобудування здійснюється в умовах жорстких екологічних і економічних вимог, що постійно підсилюються та призводять до підвищення складності конструкції двигунів, зокрема систем охолодження і мащення. Це накладає специфічні вимоги до процесу експлуатації двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), особливо в режимах передпускової і післяпускової теплової підготовки, тобто, в умовах несталих температурних і навантажувальних режимів роботи в умовах низьких температур.

Вирішення проблеми передпускового і післяпускового прогріву двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) транспортних засобів (ТЗ) і енергетичних установок (ЕУ) може досягатись за допомогою застосування комплексних систем передпускового прогріву (КСПП) у складі теплових акумуляторів (ТА) з фазовим переходом [1-3]. Розроблення і конструювання КСПП передбачає етапи не тільки технічного використання окремих складових системи, а також етапи дослідження складових елементів комплексної системи прогріву, а саме: теплоакumuлюючих матеріалів (ТАМ) до ТА фазового переходу, вибір і оптимізацію конструкції ТА в залежності від ТАМ і умов експлуатації всієї системи, кліматичних умов тощо [4]. Оптимальними температурними параметрами для двигуна і ТЗ є значення температур: +85-95 °С охолоджуючої рідини (ОР) і моторної оливи (МО) в процесі виробничої (комерційної) експлуатації, що відповідають повному згоранню палива в циліндрі; +50 °С в процесі прийняття навантаження після зберігання і прогріву та зберігання ДВЗ і ТЗ тощо.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Підвищення пускових якостей двигунів ТЗ і ЕУ та створення ефективних способів та засобів передпускової і післяпускової теплової підготовки ОР у системі охолодження (СОД) і МО в системі мащення (СМ) являє собою актуальне й багатопланове завдання. Іншим актуальним завданням, пов'язаним з низькотемпературною експлуатацією, є комплексний прогрів і зниження пускових зносів деталей двигунів ТЗ і ЕУ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для забезпечення оптимального температурного стану двигуна ЕУ і ТЗ в умовах експлуатації при створенні КСПП з ТА були проведені експериментальні і розрахункові дослідження на основі стаціонарних і транспортних двигунів [2, 4-6], а також ураховано досвід багатьох авторів [1, 3, 7].

Проведені дослідження щодо встановлення і використання систем прогріву у складі ТА з фазовим переходом [7-9] на двигунах і ТЗ при здійсненні передпускового і післяпускового прогріву в різних температурних умовах експлуатації показали суттєве скорочення часу прогріву, підвищення економічності і зниження шкідливих викидів у відпрацьованих газах (ВГ) у порівнянні зі штатними двигунами [9-13].

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою проведених досліджень є визначення часу теплової підготовки ДВЗ, показників паливної економічності й екологічних показників газового двигуна К-159М2 (6Ч 12/14), обладнаного комплексною системою передпускового прогріву (КСПП) у складі теплового акумулятора (ТА) з фазовим

переходом при здійсненні передпускової і післяпускової теплової підготовки двигуна.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити таку основну задачу: визначити параметри теплової підготовки ДВЗ в залежності від температури навколишнього середовища до температури «гарячого пуску» та можливості прийняття навантаження при здійсненні прогріву як ОР, так і МО.

Основна частина дослідження. Експериментальні й розрахункові дослідження газового двигуна К-159М2 (6Ч 12/14), виконані в Інституті газу НАНУ спільно з УкрДАЗТ і НТУ, показали, що для полегшення пуску і швидкого прогріву ОР і МО двигуна доцільно використовувати систему передпускового прогріву ДВЗ [10, 14].

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено тепловий акумулятор з теплоакумуючим матеріалом, що має фазовий перехід. Тепловий акумулятор дає змогу накопичувати теплову енергію відпрацьованих газів. Кількість теплоти, яку накопичує тепловий акумулятор, відповідає кількості теплової енергії, що потрібна для попереднього прогріву ОР і МО двигуна від максимально низької температури оточуючого повітря до температури ОР і МО «гарячого пуску» та можливості навантаження двигуна.

В основу стендових досліджень КСПП з ТА фазового переходу були покладені температурні режими ВГ, СОД і СМ з урахуванням розподілу навантажень реального двигуна в умовах експлуатації. В експериментах на створеній установці [2, 4, 5, 8-12] відтворювались режими роботи реального двигуна за температурою вхідних і вихідних параметрів стосовно ТА, який розташований одночасно як у системі випуску, так і в СОД і СМ двигуна.

Результати вимірювання часу прогріву ОР в СОД і МО в СМ газового двигуна К-159М2 з КСПП від СППД наведено на рис. 1,а,б. Випробування

КСПП в процесі дослідження тривалості прогріву від СППД проводилось як для ОР в СОД, так і для МО в СМ газового двигуна.

Отримані результати на рис. 1,а підтверджують, що при швидкості циркуляції 0,08 м/с, яка близька до швидкості циркуляції штатного насоса ОР газового двигуна в режимі холостого ходу, прогрів ОР в СОД до 85 °С відбувається за 1950 с або за 32,5 хв, а у той же час при збільшенні швидкості до 0,22 м/с, яка може бути створена циркуляційним насосом з модульованою подачею КСПП в режимі холостого ходу і яка відповідає максимальній швидкості штатного насоса ОР газового двигуна, час проріву до вказаної температури скорочується до 1432 с або до 23,9 хв. Температура 50 °С за вказаних вище умов досягається газовим двигуном відповідно без КСПП за 1370 с (22,8 хв) і з КСПП за 1070 с (17,8 хв).

Для СМ збільшення швидкості циркуляції МО також забезпечує позитивний результат (рис. 1,б). Збільшення швидкості циркуляції МО в СМ до 0,22 м/с забезпечує швидкий прогрів газового двигуна до 85 °С за 1525 с (25,4 хв) у порівнянні з прогрівом при швидкості циркуляції МО в СМ 0,08 м/с (штатна СМ двигуна) за 2025 с (33,8 хв), а до 50 °С, за вказаних вище умов, досягається відповідно – з КСПП за 1145 с (19,2 хв) у порівнянні з базовим варіантом – за 1450 с (24,2 хв).

Для проведення теоретичних досліджень розроблена, а після проведення експериментальних досліджень уточнена методика розрахунку параметрів прогріву ОР і МО, паливної економічності й екологічних показників газового двигуна К-159М2 (6Ч 12/14) при застосуванні в СОД і СМ розробленої КСПП з ТА фазового переходу під час передпускового і післяпускового прогріву [2, 4, 5, 8-12].

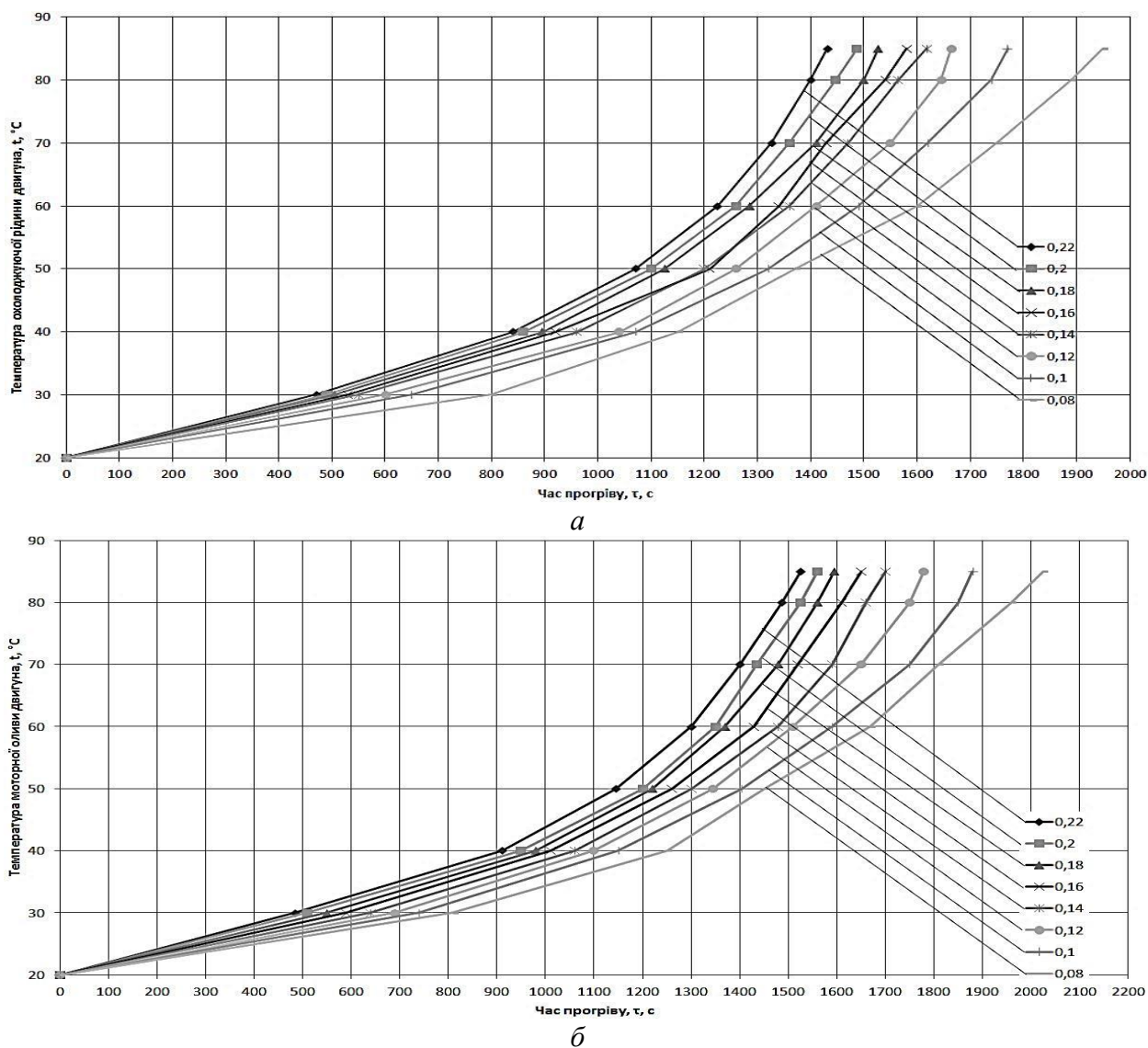
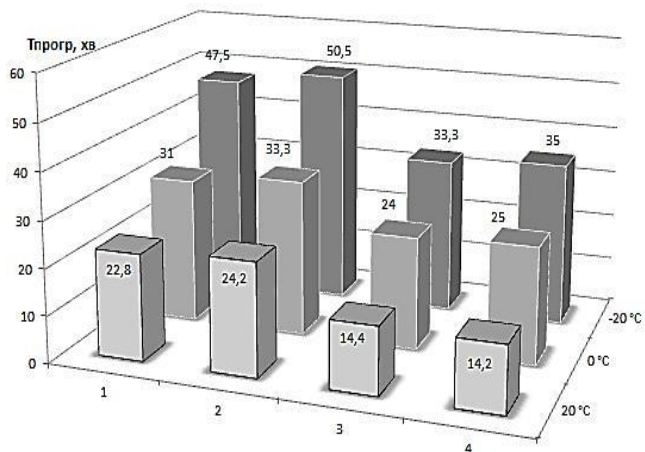


Рис. 1. Результати вимірювання параметрів прогріву газового двигуна в залежності від швидкості теплоносія  $w$ , м/с: а – часу прогріву ОР зі штатним насосом і ТА; б – часу прогріву МО зі штатним насосом і ТА

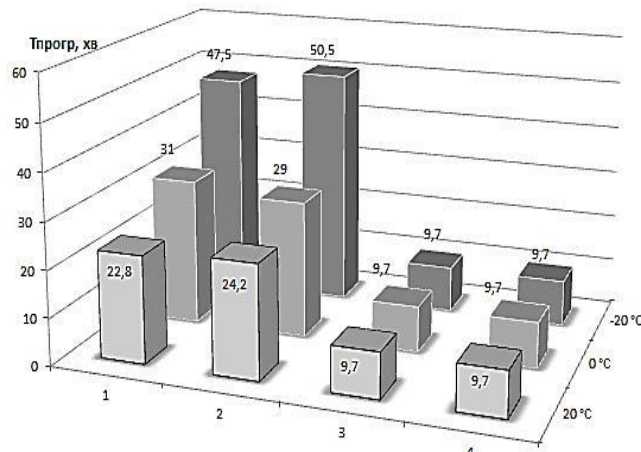
У процесі моделювання формувався цикл передпускового і післяпускового прогріву газового ДВЗ від початку розряджання теплового акумулятора (початок теплової підготовки ДВЗ) до повного його заряджання, що визначається температурою фазового переходу теплоакуюлюючого матеріалу. При моделюванні роботи СП розглядалися процеси передпускового і післяпускового прогрівання ОР і МО газового двигуна 6Ч 12/14 в інтервалі температур навколишнього середовища  $T_{oc}$ , а саме: 20 °С, 0 °С, -20 °С.

На рис. 2,а і б показані порівняльні діаграми значень часу теплової підготовки газового двигуна К-159 М2 (6Ч 12/14) при різних варіантах прогріву, а саме від  $T_{oc}$  до 50 °С (рис. 2,а) і від 50 до 85 °С (рис. 2,б), у результаті оснащення двигуна КСПП з ТА фазового переходу, хв: 1 – прогрів ОР від штатної системи (ШС) охолодження двигуна (без ТА); 2 – МО від ШС двигуна (без ТА); 3 – ОР від двигуна з ТА; 4 – МО від двигуна з ТА.

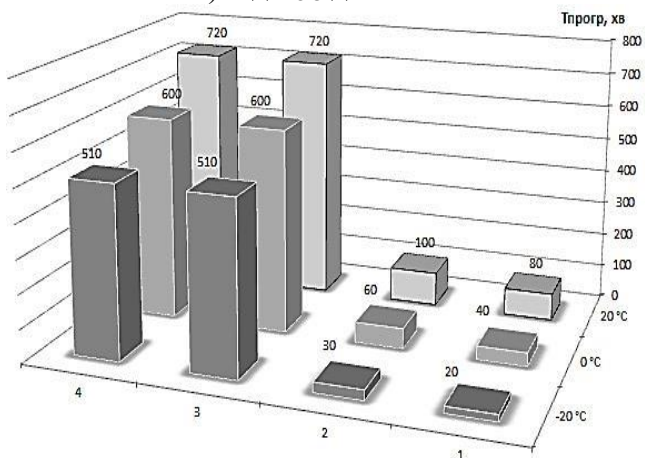




а) від  $T_{ос}$  до 50 °C



б) від 50 °C до 85 °C



в) підтримання (зберігання)  $T_{оп} \approx T_{мо} > 50$  °C

Рис. 2. Час теплової підготовки газового двигуна К-159 М2 (6Ч 12/14) при різних варіантах прогріву, а саме від  $T_{ос}$  до 50 °C (а) і від 50 до 85 °C (б) та підтримання (зберігання)  $T_{оп} \approx T_{мо} > 50$  °C (в) в умовах  $T_{ос}$  (непрацюючий двигун), у результаті оснащення двигуна КСПП з ТА фазового переходу, хв: 1 – ОР від ШС двигуна (без ТА); 2 – МО від ШС двигуна (без ТА); 3 – ОР від (в) двигуна(і) з ТА; 4 – МО від (в) двигуна(і) з ТА

З рис. 2,а видно, що прогрівання ОР від ШС охолодження двигуна (без ТА) від  $T_{ос}$  до 50 °C при +20 °C (0 °C/-20 °C) відбувається відповідно (варіант 1) за 22,8 (31/47,5) хв, а МО від ШС мащення двигуна (без ТА) від  $T_{ос}$  до 50 °C при тих же  $T_{ос}$  відбувається відповідно (варіант 2) за 24,2 (33,3/50,5) хв. Прогрівання ж ОР від двигуна з використанням КСПП з ТА фазового переходу (варіант 3) при тих же  $T_{ос}$  відбувається відповідно за 14,4 (24/33,3) хв, а МО (варіант 4) від двигуна з ТА – за 14,2 (25/35) хв. З варіантів 3 і 4 на рис. 1,а видно, що використання КСПП з ТА для прогріву двигуна однозначно дає вигравш у часі прогрівання ОР і МО в порівнянні з базовими СОД і МО з класичним методом прогріву. Час прогріву суттєво знижується у порівнянні з

класичним методом прогріву для всіх  $T_{ос} = +20$  °C (0 °C/-20 °C), а саме відповідно на 36,9 (22,9/29,9) % для ОР і на 41,3 (25/30,8) % для МО.

З рис. 2,б видно, що прогрівання ОР від ШС охолодження двигуна (без ТА) від 50 до 85 °C при +20 °C (0 °C/-20 °C) відбувається відповідно (варіант 1) за 22,8 (31/47,5) хв, а МО від ШС мащення двигуна (без ТА) від 50 до 85 °C при тих же  $T_{ос}$  відбувається відповідно (варіант 2) за 24,2 (29/50,5) хв. Прогрівання ж ОР від двигуна з використанням КСПП з ТА фазового переходу (варіант 3) при тих же  $T_{ос}$  відбувається відповідно за 9,7 (9,7/9,7) хв, а МО (варіант 4) від двигуна з ТА – за 9,7 (9,7/9,7) хв. З варіантів 3 і 4 на рис. 2,б видно, що використання КСПП з ТА для прогріву двигуна однозначно дає вигравш у

часі прогрівання ОР і МО в порівнянні з базовими СОД і МО з класичним методом прогріву. Час прогріву суттєво знижується у порівнянні з класичним методом прогріву для всіх  $T_{OC}$  відповідно, а саме відповідно на 57,5 (69/79,6) % для ОР і на 60 (71/80,8) % для МО.

На рис. 2,в показані порівняльні діаграми значень часу теплової підготовки газового двигуна К-159 М2 (6Ч 12/14) при непрацюючому двигуні в процесі підтримання (зберігання ДВЗ)  $T_{OP} \approx T_{MO} > 50$  °С в умовах  $T_{OC}$  у результаті оснащення двигуна КСПП з ТА фазового переходу, хв: 1 – ОР з ШС двигуна (без ТА); 2 – МО з ШС двигуна (без ТА); 3 – ОР у двигуні з ТА; 4 – МО у двигуні з ТА. З рис. 2,в видно, що зберігання  $T_{OP} > 50$  °С двигуна зі ШС охолодження (без ТА) при +20°С (0°С/-20°С) відбувається відповідно (варіант 1) за 80 (40/20) хв, а МО зі ШС машення двигуна (без ТА) в межах  $T_{MO} > 50$  °С при тих же  $T_{OC}$  відбувається відповідно (варіант 2) за 100 (60/30) хв. Зберігання ж теплоти ОР у двигуні з використанням КСПП з ТА фазового переходу (варіант 3) при тих же  $T_{OC}$  відбувається відповідно за 720 (600/510) хв, а МО (варіант 4) у двигуні з ТА – за 720 (600/510) хв. З варіантів 3 і 4 на рис. 3 видно, що використання КСПП з ТА для зберігання теплової енергії двигуна в процесі експлуатації двигуна однозначно дає вигоду у часі підтримання ОР і МО в прогрітому стані у порівнянні з базовими СОД і МО з класичним методом зберігання теплової енергії. Час зберігання теплової енергії суттєво збільшується у порівнянні з класичним методом зберігання для всіх  $T_{OC}$  відповідно, а саме відповідно на 900 (1400/2450) % для ОР і на 620 (900/1600) % для МО.

На рис. 3 показані порівняльні діаграми значень витрати палива, м<sup>3</sup> (рис. 3,а,б), для здійснення подогріву і

викиди оксидів азоту, г (рис. 3,в,г) та викиди твердих часток, мг (рис. 3,д,е) у процесі теплової підготовки газового двигуна К-159 М2 (6Ч 12/14) при різних варіантах прогріву, а саме від  $T_{OC}$  до 50 °С (рис. 3,а,в,д) і від 50 до 85 °С (рис. 3,б,г,е) у результаті оснащення двигуна КСПП з ТА фазового переходу: 1 – ОР від ШС двигуна (без ТА); 2 – МО від ШС двигуна (без ТА); 3 – ОР від двигуна з ТА; 4 – МО від двигуна з ТА.

З рис. 3,а видно, що при прогріві ОР і МО двигуна без використання КСПП з ТА (базові системи з класичним методом прогріву) від  $T_{OC}$  до 50 °С при +20 °С (0 °С/-20 °С) витрачається відповідно (варіант 1 і 2) 2,424 (3,147/3,764) м<sup>3</sup>, а з використанням КСПП з ТА при +20 °С (0 °С/-20 °С) витрачається за тих же умов відповідно (варіант 3 і 4) 0,636 (0,789/0,933) м<sup>3</sup>. З рис. 3,б видно, що при прогріві ОР і МО двигуна без використання КСПП з ТА (базові системи з класичним методом прогріву) від 50 до 85 °С при +20 °С (0 °С/-20 °С) витрачається відповідно (варіант 1 і 2) аналогічно 2,424 (3,147/3,764) м<sup>3</sup>, а з використанням КСПП з ТА при +20 °С (0°С/-20°С) витрачається за тих же умов відповідно (варіант 3 і 4) 0,424 (0,647/0,659) м<sup>3</sup>. З рисунка видно, що використання КСПП з ТА для прогріву двигуна однозначно дає вигоду у витраті палива при прогріванні ОР і МО в порівнянні з базовими СОД і МО з класичним методом прогріву, так, витрата палива суттєво знижується у порівнянні з класичним методом прогріву для всіх  $T_{OC} = +20$ °С (0°С/-20°С), а саме відповідно на 73,8 (74,5/75,2) % від  $T_{OC}$  до 50°С і на 82,5 (79,4/82,5) % від 50 до 85 °С для ОР і МО. При зберіганні теплової енергії для ОР і МО при використанні КСПП з ТА паливо взагалі не використовується, тому що двигун не працює.

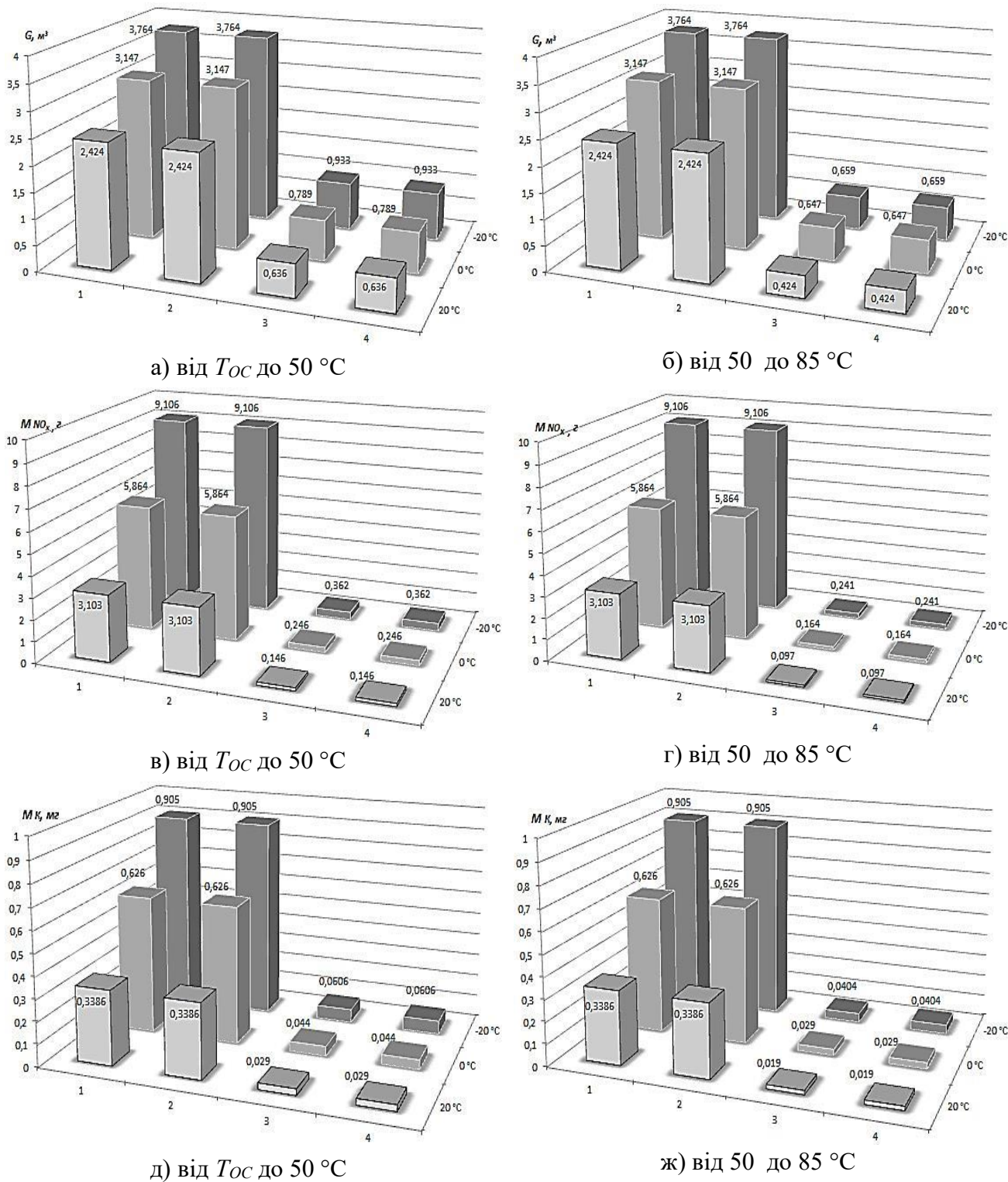


Рис. 3. Витрата палива,  $m^3$  (а, б) для здійснення прогріву і викиди оксидів азоту, г (в, г) та викиди твердих часток, мг (д, е) у процесі теплової підготовки газового двигуна К-159 М2 (6Ч 12/14) при різних варіантах прогріву, а саме від  $T_{oc}$  до 50 °C (а, в, д) і від 50 до 85 °C (б, г, е) у результаті оснащення двигуна КСПП з ТА фазового переходу: 1 – ОР від ШС двигуна (без ТА); 2 – МО від ШС двигуна (без ТА); 3 – ОР від двигуна з ТА; 4 – МО від двигуна з ТА

Аналіз рис. 3,в і з показав, що використання КСПП з ТА для прогріву двигуна однозначно дає скорочення викидів оксидів азоту при прогріванні ОР і МО в порівнянні з базовими СОД і МО з класичним методом прогріву, так скорочення викидів оксидів азоту суттєво знижується у порівнянні з класичним методом прогріву для всіх  $T_{OC} = +20^\circ\text{C}$  ( $0^\circ\text{C}/-20^\circ\text{C}$ ), а саме відповідно на 95 (96/96) % від  $T_{OC}$  до  $50^\circ\text{C}$  і на 96,9 (97,2/97,3) % від 50 до  $85^\circ\text{C}$  для ОР і МО.

Аналіз рис. 3,д і е показав, що використання КСПП з ТА для прогріву двигуна однозначно дає скорочення викидів твердих часток при прогріванні ОР і МО в порівнянні з базовими СОД і МО з класичним методом прогріву, так, скорочення викидів твердих часток суттєво знижується у порівнянні з класичним методом прогріву для всіх  $T_{OC} = +20^\circ\text{C}$  ( $0^\circ\text{C}/-20^\circ\text{C}$ ), а саме відповідно на 91,4 (92,97/93) % від  $T_{OC}$  до  $50^\circ\text{C}$  і на 94 (95,3/95,5) % від 50 до  $85^\circ\text{C}$  для ОР і МО. При зберіганні теплової енергії для ОР і МО при використанні КСПП з ТА викиди оксидів азоту і твердих часток відсутні, тому що паливо для прогріву взагалі не використовується.

Досягнуті позитивні ефекти пояснюються тим, що прогрівання ОР і МО перед пуском здійснюється з використанням теплового акумулятора КСПП, тобто пуск двигуна для їх прогріву не потрібен, а передпусковий прогрів ОР і МО здійснюється за рахунок тільки

теплоти, накопиченої тепловим акумулятором з фазовим переходом системи прогріву.

#### **Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку**

1. Розроблений ТА фазового переходу з теплоакumulюючим матеріалом поліетилен високої щільності показав свою працездатність при випробуваннях на спеціальному стенді як при зарядці, так і при розрядці.

2. Використання ТА фазового переходу КСПП для газового двигуна К-159М2 (6Ч 12/14) дає змогу суттєво покращити показники часу прогріву для всіх  $T_{OC} = +20^\circ\text{C}$  ( $0^\circ\text{C}/-20^\circ\text{C}$ ) від  $T_{OC}$  до  $50^\circ\text{C}$  до 22,9 – 36,9 % для ОР і до 25 – 41,3 % для МО, а від 50 до  $85^\circ\text{C}$  до 57,5 – 79,6 % для ОР і до 60 – 80,8 % для МО, економічності – від  $T_{OC}$  до  $50^\circ\text{C}$  до 73,8 – 75,2 % для ОР і МО, а від 50 до  $85^\circ\text{C}$  до 79,4 – 85,5 % для ОР і МО, екологічності для оксидів азоту – від  $T_{OC}$  до  $50^\circ\text{C}$  до 95 – 96 % для ОР і МО, а від 50 до  $85^\circ\text{C}$  до 96,9 – 97,3 % для ОР і МО, та твердих часток – від  $T_{OC}$  до  $50^\circ\text{C}$  до 91,4 – 93 % для ОР і МО, а від 50 до  $85^\circ\text{C}$  до 94 – 95,5 % для ОР і МО. Час зберігання теплової енергії при не працюючому двигуні з використанням ТА суттєво збільшується у порівнянні з класичним методом зберігання для всіх  $T_{OC}$  відповідно, а саме відповідно в 9 – 24,5 разів ОР і в 6,2 – 16 разів для МО. Паливо при цьому не використовується і відповідно, викиди – відсутні.

#### **Список використаних джерел**

1. Шульгин, В. В. Тепловые аккумуляторы автотранспортных средств [Текст] / В. В. Шульгин. – СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2005. – 268 с.
2. Системи прогріву двигунів внутрішнього згорання: основи функціонування [Текст] / В. П. Волков, І. В. Грицук, Ю. Ф. Гутаревич [та ін.]. – Донецьк: ЛАНДОН-ХХІ, 2015. – 314 с.
3. Вашуркин, И. О. Тепловая подготовка и пуск ДВС мобильных транспортных и строительных машин зимой [Текст] / И. О. Вашуркин. – СПб.: Наука, 2002. – 145 с.
4. Теплові акумулятори фазового переходу для транспортних засобів: параметри робочих процесів [Текст] / В. Д. Александров, Ю. Ф. Гутаревич, І. В. Грицук [та ін.]. – Донецьк: Вид-во «Ноулідж». Донецьке відділення, 2014. – 230 с.

5. Тепловий акумулятор як засіб підвищення ефективності пуску стаціонарного двигуна в умовах низьких температур [Текст] / Д. С. Адров, І. В. Грицук, Ю.В. Прилепський [та ін.] // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – Вип. 27. – С. 117-126.
6. Експериментальні дослідження системи комбінованого прогріву двигуна з тепловим акумулятором [Текст] / Д. С. Адров, І. В. Грицук, В. Д. Александров [та ін.] // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 31. – С. 158-167.
7. Schatz, D. Latentwärmespeicher für Kaltstartverbesserung von Kraftfahrzeugen [Text] / D. Schatz // Brennst. - Wärme-Kraft, 1991. №6. - P. 333-340.
8. Дослідження системи передпускового розігріву газового двигуна на основі використання теплового акумулятора з теплоакумуючим матеріалом, що має фазовий перехід [Текст] / В. С. Вербовський, І. В. Грицук, Д. С. Адров [та ін.] // Двигатели внутреннего сгорания: науч.-техн. журнал. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2013. – №1. – С. 110-116.
9. Особливості передпускового прогріву стаціонарного газового двигуна з використанням теплового акумулятора з фазовим переходом [Текст] / В. С. Вербовський, І. В. Грицук, Д.С. Адров [та ін.] // Двигатели внутреннего сгорания: науч.-техн. журнал. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2014. – №2. – С. 85-90.
10. Гутаревич, Ю.Ф. Дослідження системи комбінованого прогріву транспортного двигуна з використанням теплового акумулятора з фазовим переходом [Текст] / Ю.Ф. Гутаревич, І.В.Грицук // Двигатели внутреннего сгорания: науч.-техн. журнал. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2014. – №1. – С. 67-73.
11. Грицук, І.В. Особливості дослідження системи прогріву транспортного двигуна з використанням теплового акумулятора з фазовим переходом [Текст] / І. В. Грицук // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – Донецьк: ДонІЗТ, 2014. – Вип. 38. – С. 117-133.
12. Гутаревич, Ю.Ф. Вплив системи прогріву з тепловим акумулятором фазового переходу на показники пуску і прогріву транспортного двигуна [Текст] / Ю. Ф. Гутаревич, І. В. Грицук // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr.5. Seria:Transport. – Rzeszow, 2014. – P. 155-160.
13. Rosen M. Exergy Analysis for the Evaluation of the Performance of Closed Thermal Energy Storage Systems [Text] / M. Rosen, F.Hooper, L. Barbaris // J. of Solar Energy Engineering. 1988. Nov. V. 110. – P. 255-262.
14. Особливості розігріву газового двигуна при використанні системи передпускового прогріву [Текст] / Ю. Ф. Гутаревич, І. В. Грицук, О. С. Добровольський [та ін.] // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ, 2014. – Вип. 13. – С. 41-50.

Рецензент д-р техн. наук, професор А.П. Фалендиш

---

Грицук Ігор Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. E-mail: gritsuk\_iv@ukr.net.

Вербовський Валерій Степанович, старш. наук. співробітник, Інститут газу Національної академії наук України. E-mail: vverbovskiy@teplosoyuz.com.

Gritsuk Igor Valerievich, Candidate of Technical Science (Ph.D), associate professor, Technical Operation and Service Cars Department, Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkov, Ukraine. E-mail: gritsuk\_iv@ukr.net.

Verbovskii Valery Stepanovich, Senior Research Fell, Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. E-mail: vverbovskiy@teplosoyuz.com.

Стаття прийнята 10.05.2016 р.

УДК 656.212.5

**АНАЛІЗ РОБОТИ ПІДСИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ СКОЧУВАННЯ  
ВІДЧЕПІВ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ  
СОРТУВАЛЬНИМИ СТАНЦІЯМИ**

Д-р техн. наук О. М. Огар (УкрДУЗТ),  
М. А. Асєєв (ПАТ «Укрзалізниця»), О. А. Іваненко (УкрДУЗТ)

**АНАЛИЗ РАБОТЫ ПОДСИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ СКАТЫВАНИЯ  
ОТЦЕПОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ  
СОРТИРОВОЧНЫМИ СТАНЦИЯМИ**

Д-р техн. наук А. Н. Огарь (УкрГУЖТ),  
М. А. Асеев (ПАО «Украинские жел. дороги»), Е. А. Иваненко (УкрГУЖТ)

**THE ANALYSIS OF SUBSYSTEM OPERATION OF REGULATING THE SPEED OF  
ROLLING CARS IN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR MARSHALLING  
STATIONS**

**Doct. of techn. sciences O. Ogar, the applicant M. Asieiev, master student O. Ivanenko**

*Подано аналіз роботи підсистем регулювання швидкості скочування відцепів в автоматизованих системах управління сортувальними станціями. Розглянуто особливості роботи кожної підсистеми, а саме: взаємодію пристроїв, способи отримання необхідних вихідних даних для розрахунку технологічних параметрів і процедури реалізації прицільного та інтервально-прицільного гальмування відцепів. Наведено основні показники сортувального процесу після впровадження на сортувальних станціях автоматизованих систем управління.*

**Ключові слова:** автоматизована система управління, сортувальна гірка, відцеп, прицільне гальмування, підсистема регулювання швидкості скочування відцепів.

*Представлен анализ работы подсистем регулирования скорости скатывания отцепов в автоматизированных системах управления сортировочными станциями. Рассмотрено особенности работы каждой подсистемы, а именно: взаимодействие устройств, способы получения необходимых исходных данных для расчета технологических параметров и процедуры реализации прицельного и интервально-прицельного торможения отцепов. Представлено основные показатели сортировочного процесса после внедрения на сортировочных станциях автоматизированных систем управления.*

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, сортировочная горка, отцеп, прицельное торможение, подсистема регулирования скорости скатывания отцепов.

*Presented analysis of major subsystems to control the speed rolling unhooked in automated systems management of the leading manufacturers of such systems on marshalling yards of America, Canada, Europe and Russia. Consider the features of each work and the introduction of speed control subsystem rolling unhook at different sorting stations: the interaction between the subsystems of the device (sensors to monitor the occupancy of the path, the device calculates the speed of cars, meteorological sensors, and others), the receipt and processing of the initial information for calculation of technological parameters of its use, algorithms and procedures for*

*the implementation and the impact interval-impact braking unhooked, which are processed in the yard. The influence of the height of the hill at the speed of carriage movement, the collision between the cars on the tracks of a car yard. Presented the main indicators sorting process after the implementation of control subsystems in marshalling stations speed rolling unhook the full machining in control systems.*

**Keywords:** *automated control system, targeted regulation, sorting hill, subsystem of regulating the speed of rolling cars.*

**Вступ.** Процес розформування составів є одним з найбільш складних та енергоємних процесів на залізничних станціях. Автоматизація основних технологічних процесів на сортувальних гірках дає змогу покращити умови праці робітників, збільшити продуктивність роботи станції, зменшити експлуатаційні витрати та ефективно використовувати технологічне устаткування сортувальних гірок. У сучасних економічних умовах на сортувальних гірках України необхідно впроваджувати заходи, спрямовані на збереження енергетичних ресурсів та покращення якості сортувального процесу. Таким чином, питання вивчення досвіду експлуатації існуючих автоматизованих систем управління швидкостями скочування відцепів є дуже актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На цей час існують різноманітні автоматизовані системи управління рухом відцепів, що впроваджені на вітчизняних та закордонних сортувальних станціях.

Підсистема автоматизованого управління швидкістю скочування відцепів з гірки є однією з головних складових у комплексних автоматизованих системах управління. У процесі експлуатації вказаних підсистем виявлено окремі їх недоліки, а саме: недосконалі технологічні алгоритми, невеликий відсоток реалізації розрахункових швидкостей виходу відцепів з гальмових позицій у системі PROYARD [5], низький рівень урахування випадкових параметрів метеорологічних умов, недостатньо автоматизований процес гальмування відцепів на парковій гальмовій позиції у системі КСАУ СС [4],

неможливість достовірного моделювання точного місцезнаходження відцепів у зоні дії пристроїв контролю зайнятості колій у системі MSR-32 [6], невелика зона дії прицільного гальмування у системі DDCIII [3].

Вагомий внесок у розвиток та удосконалення систем автоматизації сортувальних гірок зробили такі відомі вчені та спеціалісти, як Ю. А. Муха, В. І. Шелухін, Д. Н. Козаченко, І. Н. Малишев, Е. Н. Лебединська, А. А. Явна, М. М. Новгородов та ін. Основна увага в працях указаних учених приділяється задачам створення універсального модуля управління гальмовими позиціями, розробленню адаптивної автоматизованої системи управління сортувальною гіркою, удосконаленню підходів до інтервального, інтервально-прицільного та прицільного регулювання швидкості скочування відцепів. Розроблені наукові положення базувались на результатах імітаційного моделювання. Основним недоліком у працях указаних авторів є неповне урахування показників метеорологічних умов на сортувальній гірці.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення ефективності процесу розформування составів на сортувальних гірках.

Задачею дослідження є виявлення основних недоліків у роботі існуючих підсистем автоматизованого управління швидкістю скочування відцепів з гірки.

**Основна частина дослідження.** На сортувальних станціях у багатьох країнах світу набули широкого розповсюдження

системи комплексної автоматизації сортувального процесу. Розрахунок та завдання основних технологічних параметрів сортувальних гірок (швидкості розпуску составів і швидкості виходу відчепів з гальмових позицій) є одним з основних призначень таких систем. Одними з найпоширеніших автоматизованих систем на сортувальних станціях є системи «Saxbi» (Франція), «DDCIII», «НС-41» та «Proyard» (США), MSR 32 (компанія Siemens), АРШ-ЦНДІ та АРШ-ГТСС (СРСР), КСАУ СП (Росія).

Усі ці системи складаються з багатьох підсистем, однією з яких є підсистема регулювання швидкості скочування відчепів на сортувальній гірці. Регулювання швидкостей відчепів у автоматизованих системах відбувається за допомогою програм та алгоритмів, для яких необхідні дані про ходові властивості відчепів, дальність пробігу, вагову категорію відчепа, швидкість руху відчепів і дані метеорологічних умов [1]. Усі ці показники система отримує через напільне устаткування, яке розташовано на гірці. У більшості автоматизованих систем регулювання швидкості відчепів здійснюється за принципом інтервально-прицільного регулювання швидкості скочування відчепів. Як правило, такі сортувальні станції облаштовані трьома гальмовими позиціями (на першій гальмовій позиції (I ГП) реалізується інтервальне регулювання, на другій гальмовій позиції (II ГП) інтервальне або інтервально-прицільне регулювання, на третій гальмовій позиції (III ГП) – прицільне регулювання). Принцип інтервально-прицільного регулювання швидкості відчепів забезпечує необхідну інтенсивність розпуску составів, підхід відчепів до гальмових позицій зі швидкістю, яка розрахована системою, співударяння відчепів у сортувальному парку зі швидкістю 1,5 м/с. Упровадження принципу інтервально-прицільного регулювання не повною мірою виключило

брак у роботі сортувальних станцій (буває пошкодження вагонів і вантажів).

Система АРШ-ЦНДІ (автоматичне регулювання швидкості) може впроваджуватись як на гірках з трьома ГП, так і на гірках з двома ГП. Основними задачами алгоритму реалізації прицільного гальмування є визначення координати прицільовання, розрахунок необхідної швидкості виходу відчепа з гальмової позиції, коригування цієї швидкості, управління уповільнювачами. На кожній колії сортувального парку встановлюються прилади КЗК (контроль заповнення колії), які визначають місцезнаходження відчепів та відстань між ними. Для забезпечення якості прицільного гальмування в системі особливу увагу приділили визначенню параметрів прискорення відчепів, які визначаються за допомогою трьох педаль на вимірювальній дільниці у момент проходження відчепів. Необхідна швидкість виходу відчепів з III ГП в системі визначається виходячи з вагової категорії відчепа, довжини відчепа, відстані, яку необхідно подолати відчепу, та прискорення відчепів [2].

Особливістю цієї системи є те, що всі результати розформування відчепів архівуються та накопичуються у системі. На основі накопиченого досвіду система реалізує (при необхідності коригує) необхідну швидкість виходу відчепів з паркової гальмової позиції.

Досвід експлуатації систем АРШ-ЦНДІ взагалі не виявив суттєвого покращення якісних показників сортувального процесу. Основним недоліком системи є низький рівень реалізації принципів інтервального та прицільного гальмування й отримання необхідних даних. При розформуванні відчепів було виявлено велику кількість втручань операторів у роботу системи. На цей час на всіх станціях, де встановлювалась така система, працюють у ручному режимі.



Автоматизована система КСАУ СС (комплексна система автоматизованого управління сортувальною станцією) впроваджена на станції Бекасово (Росія) та містить електронну технологію обробки составів, моделювання сортувального процесу в режимі реального часу, управління стрілочними переводами, уповільнювачами та сигналами, маневровими локомотивами, компресорною станцією.

Для автоматизованого регулювання швидкостей відчепів у КСАУ СС впроваджена підсистема управління прицільним гальмуванням (ПУПГ). Протягом усього процесу розпуску у ПУПГ будується динамічна модель. За результатами моделювання та інформації з напільного устаткування розраховуються необхідні швидкості виходу з паркової гальмової позиції [3].

Для підвищення якості прицільного гальмування в підсистемі враховуються основні кліматичні фактори (температура повітря, швидкість та напрямок вітру). Для цього на станції встановлюють метеостанцію.

Для визначення вільної довжини колії сортувального парку та довжини «вікон» між відчепами встановлюють сучасні пристрої КЗК (зона дії яких 300 м на кожній колії сортувального парку), які дають змогу відслідковувати рух кожного відчепа від III ГП до точки прицілювання. Інформація від пристроїв КЗК по зворотному зв'язку потрапляє до системи ПУПГ. Отримана інформація необхідна для управління I та II ГП. Пристрої КЗК дали змогу покращити якість прицільного гальмування, а саме зменшились кількість осаджувань і «вікон» між відчепами та швидкість співударяння відчепів.

Робота підсистеми ПУПГ в КСАУ СС на станції Бекасово дала змогу зменшити швидкість співударяння відчепів на коліях сортувального парку до 3,66 км/год (норма – 5 км/год) і середню довжину «вікна» з розрахунку на один вагон до 1,1 м (норма –

3 м). Середня кількість «вікон» між відчепами зменшилась до 5 на 100 відчепів, вірогідність удару між відчепами на коліях сортувального парку зі швидкістю вище 5 км/год склала 0,06 (норма – 0,09). Робота пристроїв КЗК в підсистемі ПУПГ дала змогу скоротити тривалість маневрової роботи та зменшити витрати палива при виконанні вказаної роботи майже на 15 % [4].

У процесі експлуатації підсистеми управління прицільним гальмуванням в КСАУ СС на станції Бекасово було зафіксовано велику кількість втручань у процес автоматизованого управління уповільнювачами III ГП (майже 54 000 тис. втручань на рік) через відсутність інформації про розрахункові швидкості відчепів, параметри вагонів, а також показань приладів КЗК.

Аналіз функціонування підсистеми прицільного гальмування на станції Бекасово виявив ряд недоліків, а саме: низький рівень урахування випадкових параметрів метеорологічних умов, недостатньо автоматизований процес гальмування відчепів на III ГП.

Інформаційно-керуюча система сортувальною станцією PROYARD є найпоширенішою у США та Канаді. У цих країнах ця система впроваджена на більшості сортувальних станцій (тільки у США близько 60 станцій). Принцип роботи системи PROYARD такий, як і в інших системах: у ході сортувального процесу система враховує ходові властивості відчепів і метеорологічні умови та ведеться моніторинг заповнення колій сортувального парку. Після впровадження системи PROYARD допустима швидкість співударяння відчепів не порушується майже у 90 %. Зменшилась маневрова робота на коліях сортувального парку (у середньому на 60 % по станціях США) та довжина «вікон» [5].

У процесі розформування составів у системі PROYARD виявляється невелика кількість похибок при порівнянні

розрахункових та фактичних показників тривалості розформування составів, швидкості розпуску, обсягів маневрової роботи на коліях сортувального парку та виходу відчепів з I, II та III ГП. Цей недолік системи пов'язаний з тим, що система буде та реалізує модель розформування состава без урахування відчепів, які не можна спускати з гірки. Такі відчепи з гірки спускають по окремій колії, а наступні відчепи продовжують розформувати по вже побудованій моделі.

На сортувальних станціях Європи у теперішній час переважно впроваджується система кампанії Siemens – MSR 32 (microprocessor system of railway). У підсистемі прицільного управління відчепами для реалізації якості прицільного гальмування використовують разом вагонні уповільнювачі та комбіновані вагоноосаджувальні пристрої. При цьому пристрої КЗК охоплюють не всю довжину колій сортувального парку. Алгоритм підсистеми прицільного гальмування такий: до III ГП відчеп повинен підходити зі швидкістю не більш ніж 4 м/с, а виходити зі швидкістю не більш ніж 1,5 м/с і рухатися до повної зупинки (в зоні дії приладів КЗК). Комбіновані вагоноосаджувачі забезпечують негайне просування відчепа із зони дії пристроїв КЗК по колії сортувального парку [6].

До недоліків підсистеми слід віднести неможливість достовірного моделювання точного місцезнаходження відчепів у зоні дії КЗК та неможливість реалізації принципу прицільного гальмування у ситуації, коли комбіновані вагоноосаджувальні пристрої виходять з ладу.

Автоматизованою системою управління сортувальною станцією, яка також набула широкого розповсюдження як у США, Канаді, країнах Європи, так і Китаї та деяких країнах Африки, є система DDCIII (date display control). У системі

використовуються методи та моделі інтелектуалізації процесу розпуску составів. Система компенсує вплив випадкових факторів (швидкості вітру та температури повітря) [7]. Підсистема ПКПГ у DDCIII контролює та автоматично визначає необхідну довжину пробігу на коліях сортувального парку, розраховує та реалізує необхідну швидкість виходу відчепа з ГП. Модернізація мікропроцесорної техніки, яка використовувалась у системі, стала головною перевагою, яка дала змогу врахувати всі фактори, що можуть впливати на сортувальний процес, та забезпечила автоматичну роботу як станції в цілому, так і прицільного гальмування. Автоматизація процесу прицільного гальмування відчепів зменшила довжину «вікон» майже на 90 %, а швидкість співударяння до 5,6 км/год [3].

Слід відзначити, що впровадження системи DDCIII не дає змогу зменшити обсяг маневрової роботи на коліях сортувального парку через те, що в системі прицільне гальмування розраховано тільки на 150 м по кожній сортувальній колії.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Проведений аналіз роботи підсистем прицільного гальмування в автоматизованих системах управління сортувальними станціями доводить те, що впровадження таких підсистем забезпечило мінімізацію ручних втручань при розформуванні составів, схоронність вантажів і рухомого складу та відповідно покращення показників сортувального процесу.

Наявність окремих недоліків підсистем указує на необхідність покращення ефективності їх функціонування шляхом розроблення нових або удосконалення існуючих процедур розрахунку технологічних параметрів сортувальних гірок та модернізації їх напільного устаткування.

*Список використаних джерел*

1. Hein, O., A two stage model for a marshaling yard [Text] /O. Hein // Rail International. – 1972. – № 4. – P. 249-259.
2. Автоматизация и механизация переработки вагонов на станциях [Текст] / Ю. А. Муха, И. В. Харланович, В. П. Шейкиє и др. – М.: Транспорт, 1985. – 248 с.
3. Сопоставительный анализ технических средств для механизации и автоматизации сортировочных станций применяемых на Российских железных дорогах и за рубежом [Текст] / В. И. Талалаев, А. Г. Савицкий и др. – М.: ВНИИАС МПС России, 2007. – 150 с.
4. Савицкий, А. Г. Анализ функционирования устройств управления прицельным торможением УУПТ [Текст] / А. Г. Савицкий // Гудок. – 2003. – С. 22-29.
5. Огар, О. М. Розвиток теорії експлуатації та методів розрахунку конструктивно-технологічних параметрів сортувальних гірок [Текст]: дис... д-ра техн. наук: 05.22.20 / Огар Олександр Миколайович; Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків, 2011. – 368 с.
6. Hansmann, R.S., Zimmermann, U.T. Optimal sorting of rolling stock at hump yards [Text] / R.S. Hansmann, U.T. Zimermann // Mathematics-key technology for the future. – 2007. – №8. – P. 189-203.
7. Zhau, W., Yang, X., Qin, J., Optimizing the long-term operating plan of railway marshaling station for capacity utilization analysis [Text] / W. Zhau, X. Yang, J. Qin, // The Scientific World journal. – 2014. – №3. – P. 71-84

---

Огар Олександр Миколайович, д-р техн. наук, професор, кафедра залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@gmail.com

Асєєв Максим Андрійович, здобувач, Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» ПАТ «Українська залізниця». Тел.: (057) 364-42-35. E-mail: aseev.maksim.1988@gmail.com

Іваненко Олена Андріївна, магістрант, кафедра залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@gmail.com.

Ogar Olexander, doct. of techn. sciences, professor, chair "Railway stations and junctions", Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@gmail.com.

Asieiev Maksym, the applicant, Kharkiv branch office "Project and survey institute of railway transport" PJS "Ukrainian railway". Tel.: (057) 364-42-35. E-mail: aseev.maksim.1988@gmail.com.

Ivanenko Olena, master student, chair "Railway stations and junctions", Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@gmail.com.

Стаття прийнята 10.05.2016 р.

УДК 666.941

## ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ НА ОТРИМАННЯ КЛІНКЕРНИХ МІНЕРАЛІВ У ДОЛОМІТОВОМУ КЛІНКЕРІ

Д-р техн. наук В. І. Вінниченко (ХНУБА),  
кандидати техн. наук Н. Ю. Віценко, О. М. Рязанов (ПДАБА)

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ЭНЕРГИИ НА ПОЛУЧЕНИЕ КЛИНКЕРНЫХ МИНЕРАЛОВ В ДОЛОМИТОВОМ КЛИНКЕРЕ

Д-р техн. наук В. И. Винниченко (ХНУСА),  
кандидаты техн. наук Н. Ю. Виценко, А. Н. Рязанов (ПГАСА)

## THEORETICAL DEFINITION OF ENERGY CONSUMPTION FOR CLINKER MINERALS IN THE DOLOMITE CLINKER

Dr. Sc. Science V. I. Vinnichenko, candidates techn. sciences N. YU. Vitsenko,  
A. N. Ryazanov

*Виконано аналіз можливості зниження енергетичних витрат на теплову обробку доломітового клінкеру шляхом оцінки теоретичних витрат енергії на процес. Розглянуто зміни ентальпії хімічних реакцій утворення основних мінералів. Установлено, що з найбільшою термодинамічною вірогідністю відрізняються реакції, продуктами яких є двокальцієвий силікат, трикальцієвий алюмінат та моноалюмінат кальцію, поява органіки у сировинній суміші сприяє зменшенню зміни ентальпії хімічних реакцій.*

**Ключові слова:** конкурентоспроможність, доломітовий цемент, випал клінкеру, термодинамічна вірогідність, хімічні реакції, тепла енергія, енергоефективність, ентальпія, двокальцієвий силікат, відходи доломіту, відходи збагачення вугілля, тепла обробка, зниження витрат тепла.

*Выполнен анализ возможности снижения энергетических затрат на тепловую обработку доломитового клинкера путем оценки теоретических затрат энергии на процесс. Рассмотрены изменения энтальпии химических реакций образования основных минералов. Установлено, что с наибольшей термодинамической вероятностью отличаются реакции, продуктами которых являются двухкальциевый силикат, трехкальциевый алюминат и моноалюминат кальция, появление органики в сырьевой смеси способствует уменьшению изменения энтальпии химических реакций.*

**Ключевые слова:** конкурентоспособность, доломитовый цемент, обжиг клинкера, термодинамическая вероятность, химические реакции, тепловая энергия, энергоэффективность, энтальпия, двухкальциевый силикат, отходы доломита, отходы обогащения угля, тепловая обработка, снижение затрат тепла.

*The analysis that dolomite cements produced at the present time salt solutions, so it is not competitive because of high prices of salt. A burning dolomite clinker requires a much lower cost thermal energy than Portland. The analysis can reduce energy costs to heat treatment dolomite clinker by assessing the theoretical energy costs in the process. Considered enthalpy change of formation of chemical reactions essential minerals that are capable of binding agent the ability to gain strength when mixed with water. Thermodynamic probability of chemical reactions, which*

*considered only the interaction of mineral components mixture. Found that the most likely different reaction products which are  $C_2S$ ,  $S_3A$  and  $SA$ . It was established that the emergence of organics in the raw mixture reduces the enthalpy change of chemical reactions. Reducing the enthalpy of chemical reactions provides a theoretical reduction of the heat energy for clinker burning process because the enthalpy of a chemical reaction is directly proportional to the theoretical costs of heat.*

**Keywords:** competitiveness, dolomitic cement clinker burning, the thermodynamic probability of chemical reactions, thermal energy, energy efficiency, enthalpy, dicalcium silicate, dolomite, waste, coal tailings, heat treatment, heat cost reduction.

**Вступ.** Одним із найважливіших чинників, які спроможні забезпечити конкурентоспроможність будівельних матеріалів, є витрати енергії на одиницю готової продукції, які значно впливають на собівартість матеріалів. Крім того, при зменшенні витрат теплової енергії знижується навантаження на навколишнє середовище. Це пояснюється меншими викидами парниковоутворюючих газів в атмосферу при згорянні палива.

Ураховуючи зазначене, енергозбереження є однією з найважливіших актуальних проблем сучасності. Виробництво цементу є вкрай енерговитратним. У технології виробництва цементу найбільші витрати теплової енергії спостерігаються на стадії випалу клінкеру [1]. Тому сучасна наука постійно шукає шляхи зниження енергоємності виробництва цементного клінкеру.

Останнім часом увагу дослідників привертають доломітові цементи [2–4], оскільки вони мають не тільки унікальні властивості, але й потребують менше теплової енергії на процес теплової обробки, ніж портландцементні [5–7]. Але вони замішуються розчинами солі, що значно збільшує собівартість продукції і робить доломітові цементи неконкурентоспроможними.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Значний внесок у розвиток наукової теорії створення доломітового цементу зроблено видатними вченими [8–11].

Наукові підходи до створення таких цементів були спрямовані на отримання в'язучих, які не набирали міцності при змішуванні з водою, а потребували як замішувачі використання соляних розчинів [12, 13].

Комплексному підходу з оцінкою підвищення енергоефективності виробництва таких в'язучих уваги майже не приділяється.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою статті є аналіз можливості зниження енергетичних витрат на теплову обробку шляхом оцінки теоретичних витрат енергії на процес. Задля цього необхідно розглянути зміни ентальпії хімічних реакцій утворення основних мінералів, які здатні надати в'язучому спроможність набирати міцності при замішуванні водою з появою гідросилікатів кальцію.

**Основна частина дослідження.** Необхідні умови порівняння термодинамічної вірогідності утворення мінералів при протіканні хімічних реакцій сформульовані Бабушкіним В. І., Матвеевим Г. М. і Мчедловим–Петросяном О. П. [14]. Сутність умов у тому, що для всіх реакцій, які розглядаються, у лівій частині рівнянь хімічних реакцій беруть однакову кількість вихідних речовин. Тоді значення змін ентальпії реакцій кінцевих продуктів стає таким, що їх можливо зіставити.

Термічні константи речовин, які використані при здійсненні аналізу й наведені у таблиці, взято із джерел [14–17].

## Термічні константи речовин

Формула	$\Delta H^{\circ}_{298,15}$ , ккал/ моль	$\Delta G^{\circ}_{298,15}$ , ккал/ моль	$C_p = f(t)$		
			a	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^{-5}$
CaCO <sub>3</sub>	288,45	269,78	24,98	5,24	-6,2
MgCO <sub>3</sub>	266	246	18,62	13,8	-4,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O	984	907,4	57,47	35,3	-7,86
2 β-CaO · SiO <sub>2</sub>	551,74	524,19	36,25	8,83	-7,24
MgO · SiO <sub>2</sub>	370,25	349,48	24,56	4,74	-6,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400,48	378,2	27,4	3,06	-8,47
CO <sub>2</sub>	94,05	94,26	10,55	2,16	-2,04
H <sub>2</sub> O	68,315	56,687	12,65	11,38	1,73
SiO <sub>2</sub>	217,75	204,75	11,22	8,2	-2,7
MgO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	546,054	549,9	36,8	6,4	-9,78
MgO	143,84	136,13	10,18	1,74	-1,48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> андалузит	619,57	584,72	41,22	6,24	-12,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> кіаніт	620,11	585,91	41,05	6,98	-12,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> силіманіт	618,83	583,75	39,3	8,04	-11,02
3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub>	1631,62	1539,98	115,9	11,2	-37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub>	807,46	758,46	7,06	5,1	-4,87
CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	556,18	527,7	36,01	9,98	-7,96
3CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	851	808,4	62,28	4,58	-12,09
CaO MgO 2SiO <sub>2</sub>	765,46	723,837	52,87	7,84	-15,74
CaO MgO SiO <sub>2</sub>	540,88	512,776	34,54	9,21	6,81
2CaO MgO 2SiO <sub>2</sub>	926,66	879,49	60,9	11,40	11,40
3CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub>	1091,64	1037,332	72,97	11,96	14,44
2CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>	945,55	898,74	53,73	17,68	-0,89

Для визначення термодинамічної вірогідності протікання хімічних реакцій

складено рівняння (1–14), у яких розглянуто взаємодію тільки мінеральних складових суміші:

- 1)  $CaCO_3 + MgCO_3 + Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O = 0,5(2 \beta-CaO \cdot SiO_2) + MgO \cdot SiO_2 + Al_2O_3 + 2CO_2 + 2H_2O + 0,5SiO_2$ ;
- 2)  $CaCO_3 + MgCO_3 + Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O = 0,5(2 \beta-CaO \cdot SiO_2) + MgO \cdot Al_2O_3 + 1,5SiO_2 + 2CO_2 + 2H_2O$ ;
- 3)  $CaCO_3 + MgCO_3 + Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O = 0,5(2 \beta-CaO \cdot SiO_2) + MgO + Al_2O_3 \cdot SiO_2 \text{ андалузит} + 2CO_2 + 2H_2O + 0,5SiO_2$ ;
- 4)  $CaCO_3 + MgCO_3 + Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O = 0,5(2 \beta-CaO \cdot SiO_2) + MgO + Al_2O_3 \cdot SiO_2 \text{ кіаніт} + 2CO_2 + 2H_2O + 0,5SiO_2$ ;
- 5)  $CaCO_3 + MgCO_3 + Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O = 0,5(2 \beta-CaO \cdot SiO_2) + MgO + Al_2O_3 \cdot SiO_2 \text{ силіманіт} + 2CO_2 + 2H_2O + 0,5SiO_2$ ;
- 6)  $CaCO_3 + MgCO_3 + Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O = 0,5(2 \beta-CaO \cdot SiO_2) + MgO + 1/3(3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \text{ муліт}) + 5/6SiO_2 + 2CO_2 + 2H_2O$ ;
- 7)  $CaCO_3 + MgCO_3 + Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O = 0,5(2 \beta-CaO \cdot SiO_2) + MgO + 0,5(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 0,5Al_2O_3 + 2CO_2 + 2H_2O$ ;

- 8)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{SiO}_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;  
 9)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 1/3(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3 +$   
 $+ \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{SiO}_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;  
 10)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;  
 11)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;  
 12)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 1/2(2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2) +$   
 $+ 0,5(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) + 0,5(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;  
 13)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 1/3(3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) +$   
 $+ 2/3(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) + 1/2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2) + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2/3\text{SiO}_2$ ;  
 14)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 1/2(2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2) +$   
 $+ 0,5\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .

Як видно з графіка (рис. 1), найбільшою вірогідністю відрізняються реакції 2, 9 та 8, продуктами яких є двокальцієвий силікат, трикальцієвий алюмінат та моноалюмінат кальцію. Це

свідчить про те, що в суміші відходів доломіту та відходів збагачення вугілля можливе утворення клінкерних мінералів, які мають здатність тверднути при використанні води як замішувача.

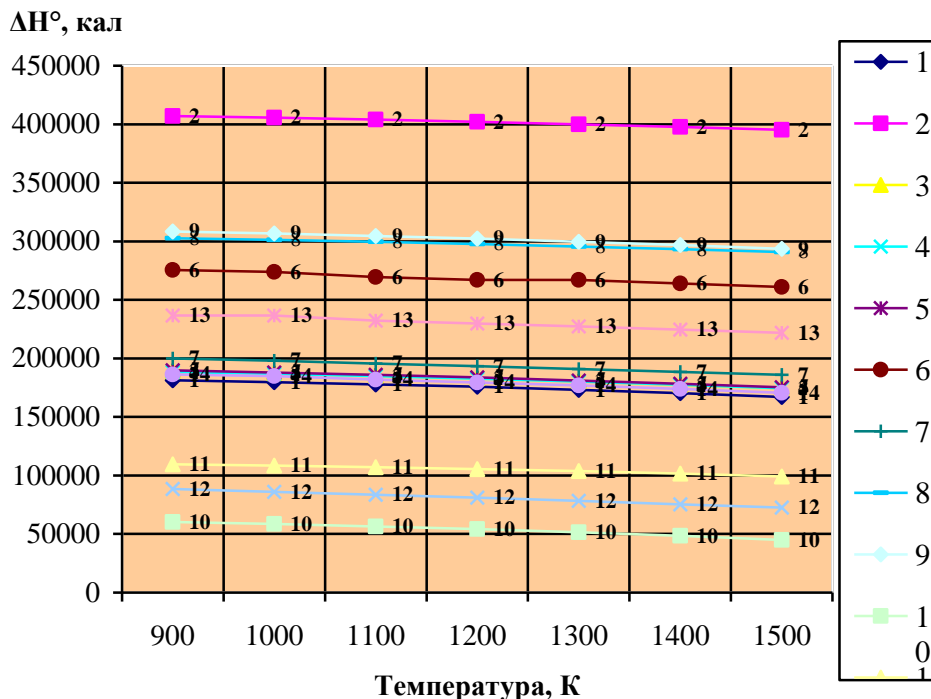


Рис. 1. Вплив температури на зміну ентальпії реакцій 1-14

З метою встановлення впливу органічної складової суміші на процес

протікання реакцій у мінеральній складовій тієї ж суміші при різних температурах наведено реакції (15-28) – рис. 2:

- 15)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 0,5(2 \beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2) +$   
 $+ \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 0,5\text{SiO}_2$ ;  
 16)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 0,5(2 \beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2) +$   
 $+ \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 1,5 \text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;

- 17)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 0,5(2 \beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2) + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 0,5\text{SiO}_2$ ;
- 18)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 0,5(2 \beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2) + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 0,5\text{SiO}_2$ ;
- 19)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 0,5(2 \beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2) + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 0,5\text{SiO}_2$ ;
- 20)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 0,5(2 \beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2) + \text{MgO} + 1/3(3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) + 5/6\text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- 21)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 0,5(2 \beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}_2) + \text{MgO} + 0,5(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) + 0,5\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- 22)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- 23)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 1/3(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- 24)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- 25)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- 26)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 1/2(2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2) + 0,5(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) + 0,5(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- 27)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 1/3(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2) + 2/3(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) + 1/2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2) + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2/3\text{SiO}_2$ ;
- 28)  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{C} + \text{O}_2 = 1/2(2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2) + 0,5\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ .

Якщо розглянути, наприклад, реакцію 2 з рис. 1 та порівняти її з реакцією 16 з рис. 2, то стає зрозуміло, що утворення тих же твердих продуктів реакцій у випадку появи органіки у сировинній суміші сприяє зменшенню зміни ентальпії хімічної реакції. Крім названих реакцій і всі інші реакції потребують менше теплової енергії для здійснення.

Порівнявши між собою отримані результати термодинамічного аналізу, можна сказати, що наявність у сировинній суміші органічної складової сприяє зменшенню ентальпії хімічних реакцій утворення первинних клінкерних мінералів. А оскільки при переведенні ентальпії хімічних реакцій мінералів в одиницю кілоджоуль на кілограм клінкеру ця величина стає теоретичною питомою витратою тепла на випал одного кілограма

клінкеру, то можна зробити висновок, що фактичні витрати тепла на випал доломітового клінкеру теж будуть знижені.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Виконана термодинамічна оцінка вірогідності утворення первинних клінкерних мінералів, здатних взаємодіяти з водою з утворенням гідросилікатів. Показано, що при наявності у сировинній суміші органічної складової синтез  $\beta$ -двокальцієвого силікату і трикальцієвого алюмінату термодинамічно вірогідний з меншими витратами енергії на утворення мінералів. Тому цей напрямок дослідження є дуже цікавим для подальшого вивчення.



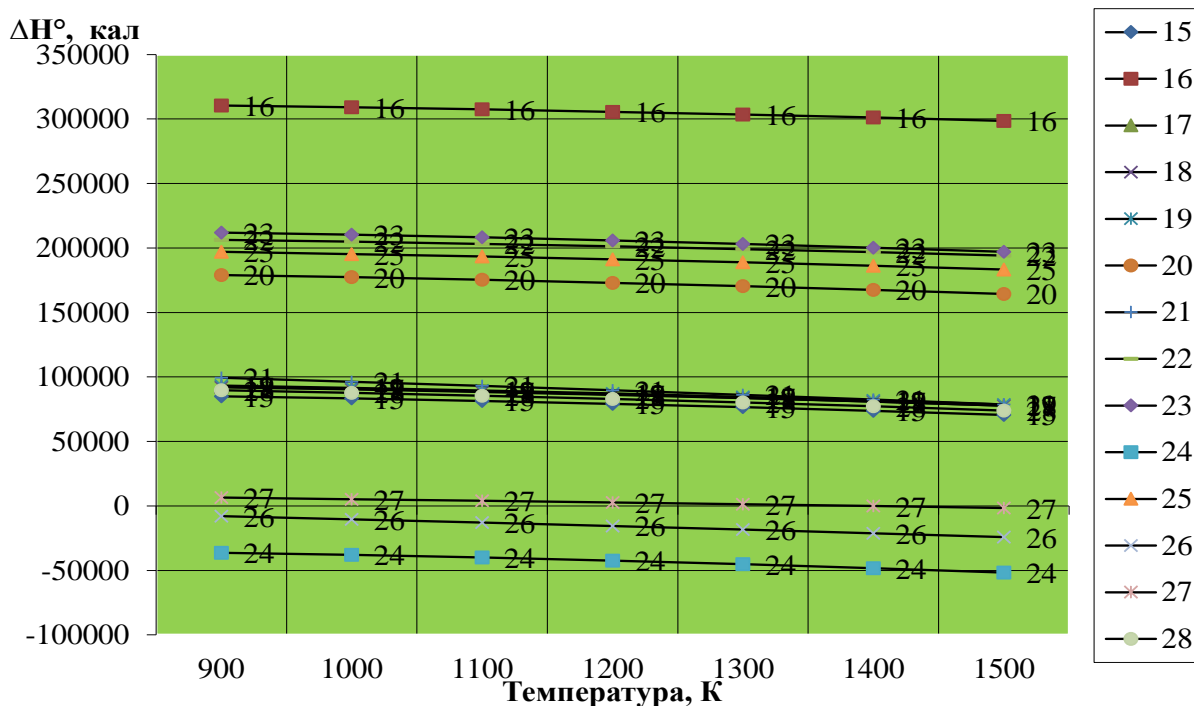


Рис. 2. Вплив температури на зміну ентальпії реакцій 15–28

### Список використаних джерел

1. Duda, Walte H. Cement-Data-Book [Text] / Walter H. Duda // Bauverlag GmbH Wiesbaden and Berlin. – 1977, – P. 363-365.
2. Зырянова, В. Н. Композиционные магнезиальные вяжущие материалы [Текст] / В. Н. Зырянова, Г. И. Бердов, Н. И. Тюленева // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Самара, 2007. – С. 189.
3. Дослідження продуктів гідратації магнезійного в'язучого на основі каустичного доломіту [Текст] / Г. М. Шабанова, В. В. Тараненкова, Г. Л. Смаль [і др.] // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2012. – №32. – С.184-188.
4. Шабанова, Г. М. Високоєфективні магнезійні в'язучі матеріали на основі вітчизняної сировини [Текст] / Г. М. Шабанова // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип.138. – С. 148-154.
5. Борисов, И. Н. Энергоэффективные строительные материалы на основе доломита и угольных отходов [Текст] / И. Н. Борисов, В. И. Винниченко, А. Н. Рязанов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. статей БГТУ им. Шухова. – Белгород, 2013. – Вып. XX. – С. 114–117.
6. Доломитовый цемент, затворяемый водой [Текст] / А. А. Плугин, В. И. Винниченко, О. С. Борзяк, А. Н. Рязанов // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип.143. – С. 87-97.
7. Рязанов, А. Н. Теоретическое обоснование комплексного использования доломита и угольных отходов для получения строительных материалов [Текст] / А. Н. Рязанов,

В. И. Винниченко, А. А. Плугин // 36. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип.138. – С. 77-85.

8. Sorel, S. Improved composition to be used as a Cement and as a Plastic Material for Molding Various Articles [Text] / S. Sorel // United States Patent Office. Patent 53/092, 6 March, 1866, Paris, France.

9. Байков, А. А. Каустический магнезит, его свойства и отвердевание [Текст] / А. А. Байков // Журнал русского металлургического общества. – 1913. – №1. – С. 207.

10. De Wolff, P.M. Hydratations prozesse und Erhartungs eigenschaften in Systemen MgO-MgCl<sub>2</sub> [Text] / P. M. De Wolff, M. L. Walter – Levy // Zement-Kalk-Gips.– 1953, – II. №4. – P. 125-137.

11. Kasai, J. Mechanism of the Hydration of Magnesia Cement [Text] / J. Kasai, M. Ichiba, Nakanara M. //J. of Chem. Soc. of Japan, 1956. –Vol. 63, № 7. – P. 1182 -1184.

12. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества [Текст] / А. В. Волженский. – М.: Стройиздат, 1986. – С. 70-99.

13. Mazuranic, C. Magnesium oxychloride cement obtained from partially calcined dolomite [Text] / C. Mazuranic, H. Biliuski., B. Matcovic //J. Amer. Ceram. Soc, 1982. – Vol. 65. – № 10. – P. 523-526.

14. Бабушкин, В. И. Термодинамика силикатов [Текст] / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мчедлов-Петросян. – М.: Госстройиздат, 1965. – 352 с.

15. Глушко, В. П., Термические константы веществ [Текст]: справочник в 10 вып. Вып. IV (C, Si, Ge, Sn, Pb). Ч. I. Таблицы принятых значений / В. П. Глушко. – М.: ВИНТИ, 1970. – 510 с.

16. Ландия, Н. А. Расчет высокотемпературных теплоемкостей твердых неорганических веществ по стандартной энтропии [Текст] / Н. А. Ландия. – Тбилиси, 1962. – 224 с.

17. Наумов, Г. Б. Справочник термодинамических величин (для геологов) [Текст] / Г. Б. Наумов, Б. Н. Рыженко, И. Л. Ходаковский. – М.: Атомиздат, 1971. – 240 с.

---

Вінніченко Варвара Іванівна, д-р техн. наук, професор кафедри механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (057) 717-80-17. E-mail: vvinnichenko@ukr.net.

Віценко Наталія Юріївна, канд. техн. наук, старш. наук. співробітник кафедри технології будівельних матеріалів, виробів і конструкцій Придніпровської державної академії будівництва і архітектури. E-mail: vitsenko.n@ukr.net.

Рязанов Олександр Миколайович, канд. техн. наук, старш. наук. співробітник кафедри технології будівельних матеріалів, виробів і конструкцій Придніпровської державної академії будівництва і архітектури. E-mail: aryazanov@hotmail.com.

Varvara Vinnichenko, Dr. Sc. Sciences, Professor, Department of mechanization of construction processes of the Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. E-mail: vvinnichenko@ukr.net.

Natalia Vitsenko, Cand. Techn. Sciences, senior researcher of department of building materials, products and structures technology of Prydniprov's'ka state academy of civil engineering and architecture. E-mail: vitsenko.n@ukr.net.

Alexander Ryazanov, Cand. Techn. Sciences, Senior Researcher of Department of Building Materials, Products and Structures Technology of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, E-mail: aryazanov@hotmail.com.

Стаття прийнята 10. 05. 2016р.

УДК 624.076.2

## МОНИТОРИНГ КОРРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТЕРИ КАЧЕСТВА

Канд. техн. наук А. Н. Гибаленко (ГВУЗ ПГТУ)

## МОНИТОРИНГ КОРОЗІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТРАТИ ЯКОСТІ

Канд. техн. наук О. М. Гібаленко (ДВНЗ ПДТУ)

## MONITORING CORROSION RISK OF STEEL CONSTRUCTIONS BASED ON CHARACTERISTICS OF QUALITY LOSS

Cand. Sc. O. M. Gibalenko

*Обоснована методика диагностики и мониторинга производственных объектов за расчетным сроком службы, включающая статистический контроль дефектов и повреждений металлоконструкций, определение уровня уязвимости и угроз, ремонтпригодности при обслуживании по фактическому состоянию. Реализация процессного подхода к управлению технологической безопасностью на объектном уровне позволила разработать и внедрить процедуры принятия решений о возможности дальнейшей эксплуатации объектов за расчетным сроком службы.*

**Ключевые слова:** металлоконструкции, мониторинг, коррозионная опасность, повреждения, технологическая безопасность.

*Обґрунтовано методику діагностики і моніторингу виробничих об'єктів за розрахунковим терміном служби, що включає статистичний контроль дефектів і пошкоджень металлоконструкцій, визначення рівня вразливості та загроз, ремонтпридатності при обслуговуванні за фактичним станом. Реалізація процесного підходу до управління технологічною безпекою на об'єктному рівні дала змогу розробити і впровадити процедури прийняття рішень про можливість подальшої експлуатації об'єктів за розрахунковим терміном служби.*

**Ключові слова:** металлоконструкції, моніторинг, корозійна небезпека, пошкодження, технологічна безпека.

*The measurable period of use in close conditions cyclically loaded metal designs of the processing equipment providing production the enterprises of the mining and metallurgical industry requires the solution a problem extension terms operation (exceeding standard) with allowance for the level of corrosion danger. Salvaging of process approach for statement and realization problems of management operational service life in corrosion environments. The principles of ensuring reliability on the level corrosion danger include justification sequence stages for an assessment in survivability a structural metalwork based on the strategy of DMAIC (define, measure, analyze, improve, control). Providing control measures from corrosion after corrosion danger allows to provide requirements reliability of structural metalwork based on calculated provisions in a method of the limiting conditions and to solve problems management in technological safety during the expected service life structural objects. Developed by organizational measures that include assessment of integral characteristics structural suitability, technological*

rationality and risk analysis of corrosion risk. The approach provides the solution of the fundamental problems assessing the level of risk on process safety: mode selection the control parameters of the structures, assessment level of vulnerability.

**Keywords:** metal construction, monitoring, corrosion danger, damage, process safety.

**Введение.** Развитие методов расчета стальных конструкций осуществляется в направлении объективной оценки значений действующих нагрузок и воздействий, а также выявления действительной работы с учетом физико-механических характеристик материала в особенности в условиях значительных коррозионно-агрессивных воздействий эксплуатационных сред. Целью работы является формирование мероприятий по обеспечению коррозионной защищенности основных фондов, как фактора обеспечения устойчивого функционирования промышленных предприятий на основании приведенной характеристики потери качества эксплуатации металлоконструкции в условиях коррозионного износа.

Анализ результатов выполненных исследований подтверждает предположение о том, что не может быть абсолютной надежности строительных конструкций и, следовательно, надежность определяется как вероятность того, что при определённых технико-эксплуатационных условиях и в определенный промежуток времени не произойдет авария [1]. Аналитическое описание этого условия представлено в виде

$$R(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m}{n} \quad (1)$$

где  $R(t)$  – надежность конструкций в интервале времени от 0 до  $t$ ;  $m$  – число конструкций (элементов), эксплуатируемых в этом интервале времени без аварии;  $n$  – число всех рассматриваемых конструкций (элементов).

Строительные металлические конструкции, запроектированные на основе одних и тех же норм, могут отличаться одна от другой степенью вероятности

появления и развития аварийных ситуаций в случае отказа какого-либо конструктивного элемента. Такие случаи возможны по различным причинам, в том числе и из-за ошибок, возникающих при создании или эксплуатации конструкций, что приводит к возникновению аварийных ситуаций [2, 3].

Сложную строительную конструкцию (сооружение) можно представить системой с параллельными элементами, которая подвержена достижению аварийного состояния при разрушении одновременно всех элементов (рис. 1).

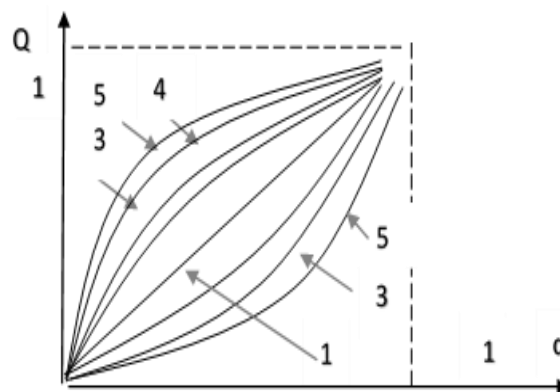


Рис. 1. Зависимость аварийности конструкций от числа элементов  $n$  (1...5)

В системе с последовательными элементами авария достигается при разрушении одного элемента.

Аварийность системы  $Q$ , состоящей из  $n$  элементов с аварийностью  $q_i$ , определится

$$Q = \prod_{i=1}^n q_{i1} \quad (2)$$

при  $q_i = const$ ,  $Q = (1-q)n$ .

Из этого следует, что вероятность аварии такой системы равна единице в том случае, если аварийность каждого элемента приближается к единице. Система с последовательными элементами более подвержена аварийности, чем система с параллельными элементами, что справедливо и для вероятности появления развития аварии.

Анализ различных отказов конструкций указывает на основные причины их возникновения: несоответствие применяемых материалов; ошибки проектирования, изготовления и монтажа; нарушение условий и режима эксплуатации; влияние человеческого фактора. В большинстве случаев аварийная ситуация возникает при совокупном воздействии нескольких факторов. Зависимость между качеством работы обслуживающего персонала и действующими нагрузками отображает графическая зависимость – частота появления ошибок от значений действующих нагрузок, а ее нелинейность означает, что низкий уровень нагрузок снижает внимание (рис. 2).



Рис. 2. Гипотетическая закономерность эффективности работы человека от действующей нагрузки

**Анализ исследований и публикаций.** При экспертном диагностировании коррозионного состояния конструкций не всегда возможно выявить значащие факторы, оказывающие влияние на протекание деградиционных процессов, оценить характер их влияния на качество эксплуатации объекта, что и вызывает необходимость создания единой методики аудита и менеджмента качества эксплуатаций металлоконструкций [6]. При этом влияние человеческого фактора распределяется по трем уровням возможного предупреждения аварийных ситуаций [4, 5].

Методической основой при разработке процедуры аудита технического состояния являются международные стандарты ИСО 9001 и МЭК 300-1, регламентирующие вопросы управления качеством на всех стадиях жизненного цикла объекта. Для выявления причин снижения эксплуатационной несущей способности конструкций используется метод оценки потери качества на основе построения диаграммы Парето (рис. 3) [7]. В соответствии с разработанным подходом контроль коррозионного состояния производится по приведенной характеристике потери качества  $F\bar{e}$  в агрессивных средах, установленного по методу Г. Тагути [8]. Показатель качества  $F\bar{e}$  (зависимость 3) является относительной характеристикой эффективности мер первичной и вторичной защиты для определения уровня риска по технологической безопасности  $Ri$  с учетом фактического воздействия факторов коррозионной агрессивности режима эксплуатации объекта [6].

Показатель качества  $F\bar{e}$  пропорционален квадрату отклонений значений контролируемого показателя  $\gamma_{zk}(\gamma_{zn})$  от его номинального значения:

$$F\bar{e} = \left[ \frac{2}{\gamma_{zk}^{max} - \gamma_{zk}^{min}} \left( \gamma_{zf} - \frac{\gamma_{zk}^{max} + \gamma_{zk}^{min}}{2} \right) \right]^2, \quad (3)$$

где  $\gamma_{zk}$  – коэффициент надежности противокоррозионной защиты, устанавливаемый при обосновании методов первичной защиты;  $\gamma_{zf}$  – коэффициент надежности противокоррозионной защиты, по данным контроля коррозионного состояния в период эксплуатации.

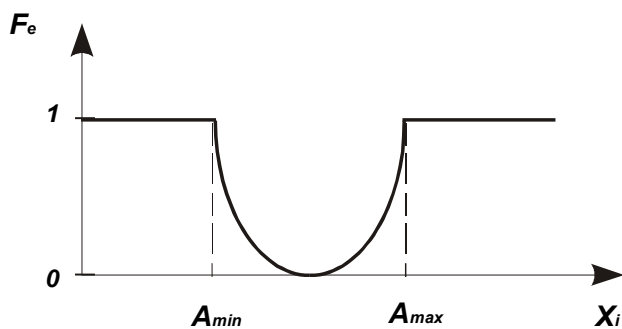


Рис. 3. Графическая зависимость экспертной оценки показателя качества эксплуатации

**Определение целей и задач исследования.** Целью работы является формирование мероприятий по обеспечению коррозионной защищенности основных фондов, как фактора обеспечения устойчивого функционирования промышленных предприятий на основании приведенной характеристики потери качества эксплуатации металлоконструкции в условиях коррозионного износа.

**Основная часть исследования.** При выполнении комплекса мероприятий по выявлению причин аварийного обрушения рудно-грейферного крана, которое произошло на предприятии металлургического производства, изучены характеристики условий эксплуатации металлоконструкций, исследовано техническое состояние основных элементов главных и поперечных ферм моста, ездových балок и элементов их крепления в соответствии с нормативными требованиями [9].

Условия эксплуатации металлоконструкций РГК характеризуются значительными динамическими воздействиями рабочих операций технологического процесса при влиянии коррозионно-агрессивных атмосферно-технологических воздействий среды эксплуатации (наличием пылевых отложений на металлоконструкциях; периодического увлажнения атмосферными осадками; воздействия коррозионно-агрессивных выделений).

В результате аварии произошло обрушение моста, консольных участков пролетного строения крана на конструкции бункерной эстакады, железнодорожные пути, вагоны подвижного железнодорожного состава, находившиеся под разгрузкой (рис. 4, 5).

По данным экспертного обследования, диагностики технического состояния установлено, что наиболее вероятной причиной обрушения конструкции является потеря несущей способности (с развитием усталостных явлений) при достижении предельного состояния (первой и второй групп) элементов гибкой опоры, пролетного строения.

Также причинами выявленного неудовлетворительного эксплуатационного состояния конструкций явились низкая технологическая дисциплина при эксплуатации и обслуживании конструкций, нарушение требований проектной документации и технологических регламентов.

Результаты численных исследований НДС несущих конструкций РГК основывались на методике расчета, с учетом специфики конструкций мостовых перегружателей, заключающейся в характере их работы [10]. Усилия в элементах определялись методом конечных элементов с использованием вычислительного комплекса «ЛИРА-САПР». Результаты численных исследований приведены на рис. 6.

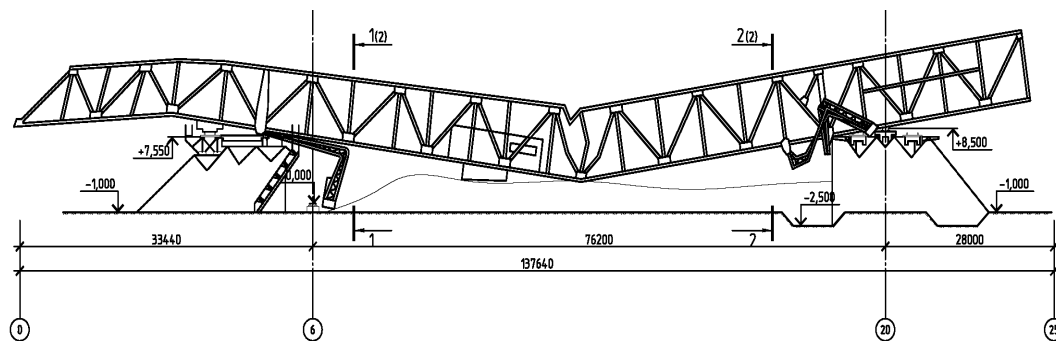
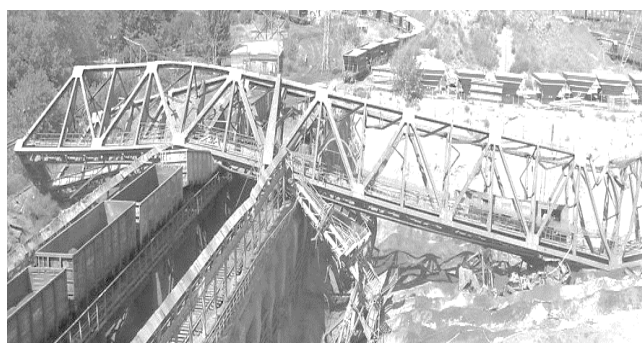


Рис. 4. Схема разрушения конструкций РГК

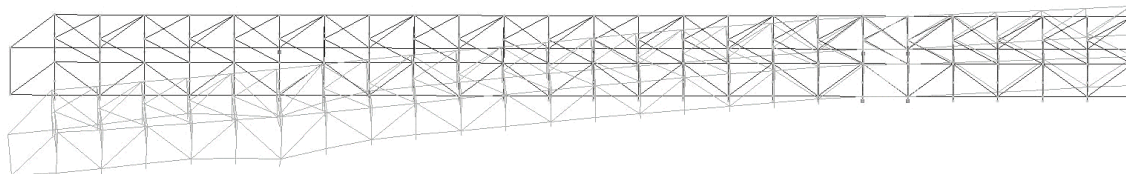


а

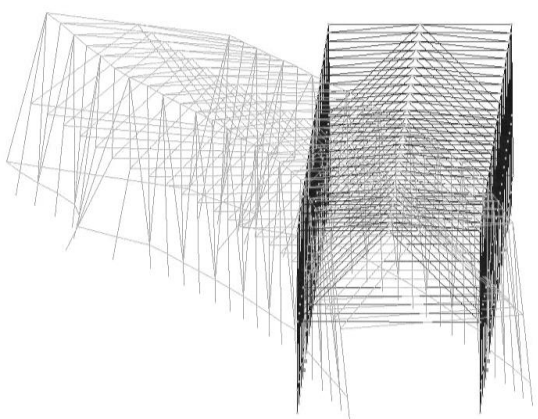


б

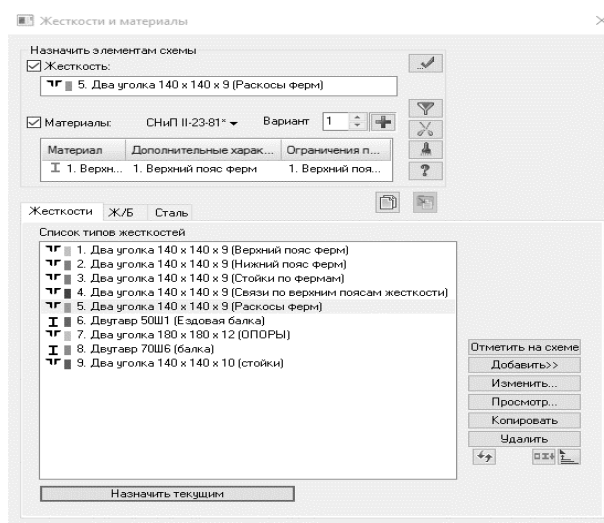
Рис. 5. Расположение конструкций крана после аварии: а – конструкции консольного участка моста и гибкой опоры; б – мост крана со стороны жесткой опоры



а



б



в

Рис. 6. Результаты исследования НДС: а – исходная и деформированная схема; б – проекция на плоскость XOZ; в – жесткостные характеристики конструктивных элементов

**Выводы**

1. Практическая реализация предложенного методического подхода позволила сделать ряд выводов: работоспособное состояние рудно-грейферного крана в целом характеризуется обобщающими показателями действительного состояния конструкций; устанавливается функциональная зависимость между работоспособностью перегружателя и значениями обобщающих показателей; контроль состояния выполняется проверкой нахождения в допустимых пределах значений этих показателей (таблица).

2. По данным мониторинга технического состояния установлено, что при III категории технического состояния, высоком уровне уязвимости для группы ответственности R2 уровень риска стальных конструкций перегружателя по технологической безопасности составляет 8 баллов в соответствии с требованиями таблицы.

3. Разработанный методический подход обеспечивает формализацию основных

задач оценки уровня риска по показателям технологической безопасности:

- выбора режима контроля параметров конструкций по результатам оценки повреждаемости и допустимым интервальным значениям ремонтпригодности; количественной оценки показателей ремонтпригодности на основании расчета стальных конструкций на коррозионную стойкость и долговечность;

- анализа уровня уязвимости стальных конструкций в зависимости от степени критичности (категории) дефектов и повреждений; оценивание угроз (категории технического состояния) при эксплуатации по фактическому состоянию для установленных значений ремонтпригодности стальных конструкций;

- восстановление эксплуатационных свойств, продление ресурса стальных конструкций и понижение уровня риска при реализации мер программы обеспечения надежности производственных зданий и сооружений.

Таблица

Уровни рисков по технологической безопасности  $R_i$

Группы ответственности по технологической безопасности. Объекты с функциями	Уровень угрозы (категория технического состояния)														
	Низкий (I)			Ограниченный (II)			Средний (III)			Высокий (IV)			Предельный (V)		
	Оценка уязвимости (категория ответственности)														
	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А
обслуживания непроизводственного назначения R5	1	2	3	2	3	4	3	4	5	4	5	6	5	6	6
обслуживания производственного назначения R4	2	3	3	3	4	5	4	5	6	5	6	7	6	7	7
вспомогательных объектов R3	3	3	4	4	5	6	5	6	7	6	7	8	7	8	8
основных, допускающие ремонт и техническое обслуживание без регламентной остановки R2	4	4	5	5	5	7	6	7	8	7	8	9	8	9	9
основных, для которых ремонт и техническое обслуживание выполняется при регламентной остановке R1	5	5	6	5	6	7	7	8	8	8	9	10	9	10	10



*Список использованных источников*

1. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с.
2. Bingen, Yang Stress, strain, and structural dynamics / Bingen Yang // USA: Elsevier Academic Press. – 2005. – 961 p.
3. Dhillon, B. S. Engineering and Technology Management Tools and Applications/ B.S. Dhillon // Artech House TM@Professional Development Library: - 2002. - 401 p.
4. Dhillon B.S. Engineering reliability - new techniques and applications B S Dhillon and C Singh, John Wiley & Sons, USA (1981) ISBN 0 471 05014 8, 339 p.
5. Dhillon, B.S. Reliability, quality and safety for engineers / Dhillon B.S //By Technometrics Reads Impact Factor:48(1): 2006. - P. 151-152.
6. Korolov, V. Design criteria of reliability and safety in the design of corrosion protection of structural steel / V. Korolov, Y. Vysotskyu, Y. Filatov / EUROCORR-2014. The European Corrosion Congress «Improving materials durability: from cultural heritage to industrial applications». – Pisa, Book of Abstracts. 2014. – 88 p.
7. Гибаленко, А. Н. Мониторинг остаточного ресурса металлоконструкций в коррозионных средах [Текст] / А. Н. Гибаленко // Зб. наук. праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – Вип. 3 (45). – С.110 – 116.
8. Taguchi, G. Taguchi's Quality Engineering Handbook / Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Yui Wu. – U.S.A.: John Wiley & Sons. – 2004. – 1696 p.
9. Пособие по контролю состояния строительных металлических конструкций зданий и сооружений в агрессивных средах, проведению обследований и проектированию восстановления защиты конструкций от коррозии (к СНиП 2.03.11-85) [Текст] / сост.: А. И. Голубев, Е. В. Горохов, В. П. Королев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1989. – 51 с.
10. Zienkiewicz, O.C. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics Sixth edition / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor // Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803. – 2005. – 648 p.

Рецензент д-р техн. наук, професор В.П. Корольов

---

Гибаленко Олександр Миколайович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Будівництво, технічна експлуатація і реконструкція», ГВУЗ, «Приазовський державний технічний університет». Тел. +38 (050) 473-14-52. E-mail: alexgib@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2979-5225.

Gibalenko Oleksandr, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Construction, Technical Operating and Reconstruction, Pryazovskyi State Technical University. Tel.: +38 (050) 473-14-52. E-mail: alexgib@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2979-5225.

Стаття прийнята 10.05.2016 р.

УДК 626/627

**ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ МОНТАЖНИХ МАЙДАНЧИКІВ БУДІВЕЛЬ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЗА КРИТЕРІЯМИ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ПРОТИ ЗСУВУ І СПЛИВАННЯ НА ПРИКЛАДІ ГІДРОВУЗЛІВ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ**

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

**ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МОНТАЖНЫХ ПЛОЩАДОК ЗДАНИЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО КРИТЕРИЯМ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ СДВИГА И ВСПЛЫТИЯ НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ ДНЕПРОВСКОГО КАСКАДА**

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

**PROBABILISTIC RELIABILITY ASSESSMENT OF ERECTION BAYS AT POWERHOUSES BY THE CRITERIA OF STABILITY LOSS AGAINST DISPLACEMENT AND FLOATING UP ON THE EXAMPLE OF HYDRO SCHEMES OF THE DNIEPER CASCADE**

Cand. of techn. sciences A. Mozgovyy

*Набув подальшого розвитку метод оцінки надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву по плоских і нахилених поверхнях при поступальному і косому зсувах, а також спливання. Ураховано випадковий характер зовнішніх навантажень і впливів, які під час експлуатації сприймають монтажні майданчики, а також кореляційні залежності між ними. Ураховано випадковий характер механічних властивостей ґрунтів основи і кореляційні залежності між ними. Метод апробований на монтажних майданчиках будівель гідроелектростанцій гідровузлів Дніпровського каскаду.*

**Ключові слова:** оцінка надійності, втрата стійкості, кореляційна залежність, монтажний майданчик, Дніпровський каскад.

*Получил дальнейшее развитие метод оценки надежности монтажных площадок зданий гидроэлектростанций по критериям потери устойчивости против сдвига по плоским и наклонным поверхностям сдвига при поступательном и косом сдвигах, а также всплытия. Учтен случайный характер внешних нагрузок и воздействий, которые во время эксплуатации воспринимают монтажные площадки, а также корреляционные зависимости между ними. Учтен случайный характер механических свойств грунтов основания и корреляционные зависимости между ними. Метод апробирован на монтажных площадках зданий гидроэлектростанций гидроузлов Днепровского каскада.*

**Ключевые слова:** оценка надежности, потеря устойчивости, корреляционная зависимость, монтажная площадка, Днепровский каскад.

*The most common types of hydro schemes for power generation are powerhouses, which include erection bays assigned for assembly or repair of the units.*

*This work further develops the method for assessing reliability of erection bays at powerhouses by the criteria of stability loss against forward and slanting displacement along flat and inclined surfaces as well as floating up. The work also considers the random nature of the*

*external loads and impacts, which erection bays at powerhouses bear during operation, as well as correlations between natural factors. It also considers the random nature of mechanical properties of the soil in the foundation 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.*

*In order to approbate the proposed method, a numerical probabilistic assessment of the risk of losing stability against displacement and floating up erection bays at the powerhouses of the Dnieper cascade of hydro schemes was performed. Correctness of the obtained results is confirmed by their correspondence with the reliability assessment of the powerhouses of the Dnieper cascade by deterministic analyses using the method of boundary conditions.*

*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.*

**Keywords:** *reliability assessment, stability loss, correlation, erection bay, Dnieper cascade.*

**Вступ.** Проектування і розрахунок гідротехнічних споруд потребують оцінки їх надійності і безпеки на основі ймовірнісних методів [1, 2]. Одним із найбільш поширених типів споруд водопідпірного фронту гідровузлів енергетичного призначення є будівлі гідроелектричних станцій (ГЕС), до складу яких входять монтажні майданчики, призначені для укрупнювального складання і ремонту агрегатів. Надійність монтажних майданчиків будівель ГЕС впливає на надійність гідровузла і каскаду гідровузлів у цілому.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями.** Існуючі методи оцінки надійності гідротехнічних споруд, зокрема будівель гідроелектростанцій, не враховують певні кореляційні залежності [3], які існують між природними факторами: гідрологічними характеристиками, льодовими, вітровими, температурними навантаженнями і впливами, які є визначальними при оцінці надійності каскадів гідровузлів [4, 5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Методи оцінки експлуатаційної надійності водопропускних споруд і гідроелектростанцій, підходи до оцінки надійності бетонних гідротехнічних споруд, статистичні методи аналізу їх стану

з урахуванням натурних даних, розроблення критеріїв їх надійності розглянуто у роботах О. І. Вайнберга [6], О. М. Фінагенова [7], С. Г. Шульмана [7], Є. М. Дзюбанова [8], Н. Ю. Дмитрієва [8], М. П. Левіної [8], В. Б. Штільмана [8], Л. Д. Лентяєва [9], Л. В. Смирнова [9], Ц. Є. Мірцхулави [10], Д. В. Стефанішина [11] та ін. Удосконалення методів забезпечення надійності складних природно-технічних систем, аналіз ризику у гідротехніці, прогнозування аварійності гідротехнічних об'єктів розглянуто у роботах А. Б. Векслера [12], Д. А. Івашинцева [12], Д. В. Стефанішина [12], Р. Voccotti [13], R. Rosso [13], D. S. Bowles [14], K. V. Bury [15, 16], H. Kreuzer [15, 16], R. N. Chowdhary [17], D. Grivas [17], K. Douglas [18], M. Spannagle [18], R. Fell [18], F. Lemperiere [19], L. A. McDonald [20] та ін.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Узагальнення вітчизняного і закордонного досвіду оцінки надійності об'єктів гідротехнічного будівництва свідчить про актуальність подальшого удосконалення існуючих методів оцінки надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів. Ця робота спрямована на оцінку надійності монтажних майданчиків будівель ГЕС, які входять до складу споруд

водопідпільного фронту гідровузлів Дніпровського каскаду, з урахуванням кореляційних залежностей, які існують між природними факторами, які є визначальними при оцінці надійності каскадів гідровузлів.

**Основна частина дослідження.** Нижче наведено характеристики монтажних майданчиків гідроелектростанцій гідровузлів Дніпровського каскаду.

**Монтажний майданчик гідроелектростанції Київського гідровузла** закритого типу із розмірами у плані 50,6×29,93 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу, верхнього і нижнього б'єфів виконано обернені засипки від позначки +82,40 м до позначки +107,00 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити товщиною від 4,7 м до 2,6 м. Монтажний майданчик розрахований на монтаж одного агрегата і обслуговується мостовим краном в. п. 75 т. Основою монтажного майданчика служать алювіальні дрібнозернисті піски потужністю 10-20 м. Клас наслідків споруд СС2-1.

**Монтажний майданчик гідроелектростанції Канівського гідровузла** закритого типу із розмірами у плані 52,4×50,7 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу, верхнього і нижнього б'єфів виконано обернені засипки від позначки +73,40 м до позначки +98,00 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити. Товщина плити 3,0 м. Монтажний майданчик розрахований на монтаж одного агрегата і обслуговується мостовим краном в. п. 100/20 т. Основою монтажного майданчика служать піски різної крупності із прошарками супісків і суглинків. Клас наслідків споруд СС2-1.

**Монтажний майданчик гідроелектростанції Кременчуцького гідро-**

**вузла** закритого типу із розмірами у плані з урахуванням розмірів пристанційного майданчика 68,5×36,3 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу і верхнього б'єфа виконано обернені засипки від позначки +60,0 м до позначки +86,00 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити, заанкереної в основу. Товщина плити 1,20 м. Стіни підземної частини будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 4,0 м, 3,80 м. Основою монтажного майданчика служать граніти. Клас наслідків споруд СС3.

**Монтажний майданчик гідроелектростанції Дніпродзержинського гідровузла** закритого типу із розмірами у плані з урахуванням розмірів пристанційного майданчика 71,0×44,0 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу і верхнього б'єфа виконано обернені засипки від позначки +49,40 м до позначки +59,25 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент рамної конструкції виконаний із монолітного залізобетону. Порожнини у тілі фундаменту заповнені ущільненою піщаною засипкою. Стіни підземної частини будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 2,5 м, 1,50 м. Основою монтажного майданчика служать скельні породи.

**Монтажний майданчик гідроелектростанції Каховського гідровузла** закритого типу із розмірами у плані 63,0×30,0 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу, верхнього і нижнього б'єфів виконано обернені засипки від позначки -12,50 м до позначок +21,20 м, +16,150 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити. Товщина плити 3,150 м. Порожнини у підземній частині будівлі заповнені

ущільненою піщаною засипкою. Стіни підземної частини будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 3,7 м, 2,85 м. Монтажник майданчик обслуговується мостовим краном в. п. 250/30 т і козловим краном в. п. 2×50/25 т. В основі монтажного майданчика залягають алювіальні дрібнозернисті піски, потужність шарів 7÷8 м. Нижче залягають вапняки потужністю 1÷3,5 м, ще нижче – дрібнозернисті глинисті піски потужністю 26-28 м. Клас наслідків споруд СС3.

**Нормативна методика оцінки надійності монтажних майданчиків за критерієм втрати стійкості проти зсуву і спливання.** Оцінка надійності монтажних майданчиків виконується для основного й особливого сполучення навантажень. У відповідності до [1, 2] стійкість на зсув і спливання монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій забезпечена при виконанні умови

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

де  $F$  – розрахункове значення узагальненого силового впливу з урахуванням коефіцієнта надійності за навантаженням  $\gamma_f$ ;

$R$  – узагальнена несівна здатність споруди чи основи;

$\gamma_{lc}$  – коефіцієнт сполучення навантажень, приймається для основного сполучення навантажень у період експлуатації  $\gamma_{lc} = 1,0$ ; для особливого (аварійного) сполучення навантажень  $\gamma_{lc} = 0,9$ ;

$\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи приймається згідно з [1],  $\gamma_c = 1,1$ ;

$\gamma_n$  – коефіцієнт надійності, приймається за [1]  $\gamma_n = 1,25$  для споруд класу наслідків СС3,  $\gamma_n = 1,2$  для споруд класу наслідків СС2-1.

При виконанні розрахунків стійкості монтажних майданчиків розглядаються такі навантаження і впливи [21]:

- постійні навантаження: власна вага споруди, силовий вплив води при нормальному підпірному рівні верхнього б'єфа, рівні нижнього б'єфа;

- тимчасові тривалі навантаження: тиск наносів, які відкладаються перед спорудою;

- короткочасні навантаження: силовий вплив води при рівнях у верхньому і нижньому б'єфах: тиск води на верхову і низову грані споруди, силовий вплив води, що фільтрується, динамічні навантаження;

- тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру;

- навантаження від підйомних, перевантажувальних і транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів (мостових і підвісних кранів);

- особливі навантаження;

- силовий вплив води, обумовлений порушенням одного із дренажних або одного із протифільтраційних пристроїв, при нормальному підпірному рівні у верхньому б'єфі і рівні нижнього б'єфа, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними й екологічними вимогами витрат води;

- сейсмічні впливи.

Перераховані навантаження і впливи приймаються в основному або в особливому сполученнях. При розрахунках стійкості монтажних майданчиків на основне сполучення навантажень і впливів ураховуються постійні, тимчасові тривалі і короткочасні навантаження. Розрахунок стійкості монтажних майданчиків на особливе сполучення навантажень і впливів виконується на дію навантажень основного сполучення і одного з особливих. Навантаження і впливи повинні прийматись у найменш сприятливих можливих сполученнях.

Для оцінки ризику втрати стійкості на зсув і спливання за методом граничних станів формулу (1) доцільно подати у вигляді [6]

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

де  $k$  – розрахункове значення коефіцієнта запасу стійкості на зсув або спливання;

$k_n$  – нормативне значення коефіцієнта запасу стійкості.

Виконано оцінку надійності монтажних майданчиків на зсув і спливання за нормативною методикою. Отримано такі значення розрахункових і нормативних коефіцієнтів запасу стійкості на зсув  $k_{p,u}$  і спливання  $k_{p,v}$  при різних розрахункових випадках:

- монтажний майданчик будівлі ГЕС Київського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1,09$ ;  $k_{p,u} = 1,14$ ;  $k_{p,v} = 1,66$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0,98$ ;  $k_{p,u} = 1,07$ ;  $k_{p,v} = 1,44$ ;

- монтажний майданчик будівлі ГЕС Канівського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1,09$ ;  $k_{p,u} = 1,51$ ;  $k_{p,v} = 2,32$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0,98$ ;  $k_{p,u} = 1,08$ ;  $k_{p,v} = 1,58$ ;

- монтажний майданчик будівлі ГЕС Кременчуцького гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1,14$ ;  $k_{p,u} = 1,83$ ;  $k_{p,v} = 3,17$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1,02$ ;  $k_{p,u} = 1,29$ ;  $k_{p,v} = 1,54$ ;

- монтажний майданчик будівлі ГЕС Дніпродзержинського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1,09$ ;  $k_{p,u} = 6,63$ ;  $k_{p,v} = 3,49$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0,98$ ;  $k_{p,u} = 5,79$ ;  $k_{p,v} = 1,71$ ;

- монтажний майданчик будівлі ГЕС Каховського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1,14$ ;  $k_{p,u} = 1,83$ ;  $k_{p,v} = 3,18$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1,02$ ;  $k_{p,u} = 1,61$ ;  $k_{p,v} = 2,98$ .

Таким чином, надійність споруд будівель монтажних майданчиків гідровузлів Дніпровського каскаду за умовою стійкості проти зсуву і спливання за нормативною методикою забезпечена.

Для розв'язання задач системної теорії надійності широко використовуються методи: числового інтегрування, статистичної лінеаризації, статистичної параболізації, однак у роботі [6] доведено, що у випадку існування між елементами системи кореляційних зв'язків найбільш зручним є метод статистичних випробовувань (метод Монте-Карло).

Розв'язання передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їх імовірнісних характеристик, а також визначення ймовірності ризику втрати стійкості монтажного майданчика будівлі ГЕС проти зсуву і спливання.

При розгляданні схеми плоского поступального зсуву по горизонтальній чи нахиленій поверхнях рівняння зв'язку має вигляд

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

де  $k$  – коефіцієнт стійкості;

$V$  – підсумок вертикальних сил, спрямованих униз;

$W$  – підсумок вертикальних сил, спрямованих догори;

$A_n$  – площа подошви споруди;

$F$  – узагальнена сила зсуву.

У випадку піщаних ґрунтів доданком  $c \cdot A_n$  можна знехтувати.

Розрахунок коефіцієнта стійкості на спливання виконується за формулою

$$k_v = \frac{V}{W}. \quad (4)$$

Вхідними параметрами є геометричні характеристики будівлі ГЕС, характеристики активних сил зсуву, а також пасивних сил, що опираються зсуву. Вихідними параметрами є результати розрахунку – коефіцієнти стійкості проти зсуву або спливання.

Імовірнісний метод визначення ризику втрати стійкості монтажного майданчика будівлі ГЕС проти зсуву (або спливання) за методом статистичних випробувань передбачає виконання  $N$  випробувань. При кожному випробуванні реалізується такий підхід:

1. Задається випадкова ймовірність  $P_V$ , розподілена рівномірно від 0 до 1, підсумку вертикальних сил  $V$ , що діють на монтажний майданчик, спрямованих униз. За значенням  $P_V$  визначається квантиль – значення вертикальних сил  $V$ .

2. Задається випадкова ймовірність  $P_W$ , розподілена рівномірно від 0 до 1, підсумку вертикальних сил протитиску  $W$ , що діють по підшві монтажного майданчика, спрямованих догори. За значенням  $P_W$  визначається квантиль – значення вертикальних сил  $W$ .

3. Задається випадкова ймовірність  $P_F$ , розподілена рівномірно від 0 до 1, узагальненої сили зсуву  $F$ . За значенням  $P_F$  визначається квантиль – значення сили зсуву  $F$ .

4. Задаються випадкові ймовірності  $P_{tg\varphi}$  і  $P_c$ , розподілені рівномірно від 0 до 1, тангенса кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питомого зчеплення  $c$  ґрунту основи. За значеннями  $P_{tg\varphi}$  і  $P_c$  визначаються квантилі – значення тангенса кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питомого зчеплення  $c$ .

5. Використовуючи рівняння зв'язку (3), (4), обчислюються значення коефіцієнтів стійкості проти зсуву  $k_u$  і спливання  $k_v$ .

6. Перевіряється виконання умови  $k_u \geq 1$  (або спливання  $k_v \geq 1$ ).

7. Після завершення  $N$  випробувань обчислюється величина ризику (імовірності) виникнення аварії за критерієм втрати стійкості проти зсуву (або спливання)  $P_T$  упродовж призначеного строку служби, як відношення кількості випробувань  $N_I$ , коли виконуються умови  $k_u < 1$  (або  $k_v < 1$ ), до загальної кількості випробувань  $N$ .

8. Щорічний ризик виникнення аварії  $P$  за критерієм втрати стійкості проти зсуву (або спливання) обчислюється за формулою [22]

$$P = 1 - (1 - P_T)^{\frac{1}{T}}, \quad (5)$$

де  $T$  – призначений строк служби, рр.

9. Значення щорічної ймовірності ризику втрати стійкості будівлі монтажного майданчика порівнюється із нормативною величиною [1].

Запропонований метод визначення ризику втрати стійкості проти зсуву і спливання реалізовано на прикладі монтажного майданчика Кременчуцького гідровузла Дніпровського каскаду.

Схема будівлі монтажного майданчика Кременчуцького гідровузла подана на рисунку.

Площа основи монтажного майданчика  $A_n = 2351 \text{ м}^2$ . Довжина секції 68,50 м, ширина 36,30 м. Власна вага секції  $G_b = 560,0 \text{ МН}$ .

Задається випадкова щорічна ймовірність швидкості вітру  $pV_r$ , розподілена від 0 до 1. За даними [23] імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у містах Київ, Канів, Дніпродзержинськ, Запоріжжя можуть бути подані нормальним розподілом, у містах Канів, Кременчук, Каховка – логарифмічно-нормальним розподілом.

За значенням  $pV_r$  визначається квантиль – швидкість вітру  $V_r$ , м/с. У відповідності до ймовірнісної методики розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій необхідне знання розподілів випадкових величин, які відповідають розрахунковому строку служби споруди. Для монтажного майданчика будівлі ГЕС Кременчуцького гідровузла класу відповідальності СС3 розрахунковий строк служби становить  $T = 100$  рр. Ординати функції розподілу максимальної швидкості вітру  $V$ , м/с, за розрахунковий строк служби  $T$  у географічному місці

розрахунку Кременчуцького гідровузла за розрахунковий строк служби отримані

піднесенням до степеня  $T$  ординат розподілів щорічної швидкості вітру  $V_r$ , м/с.

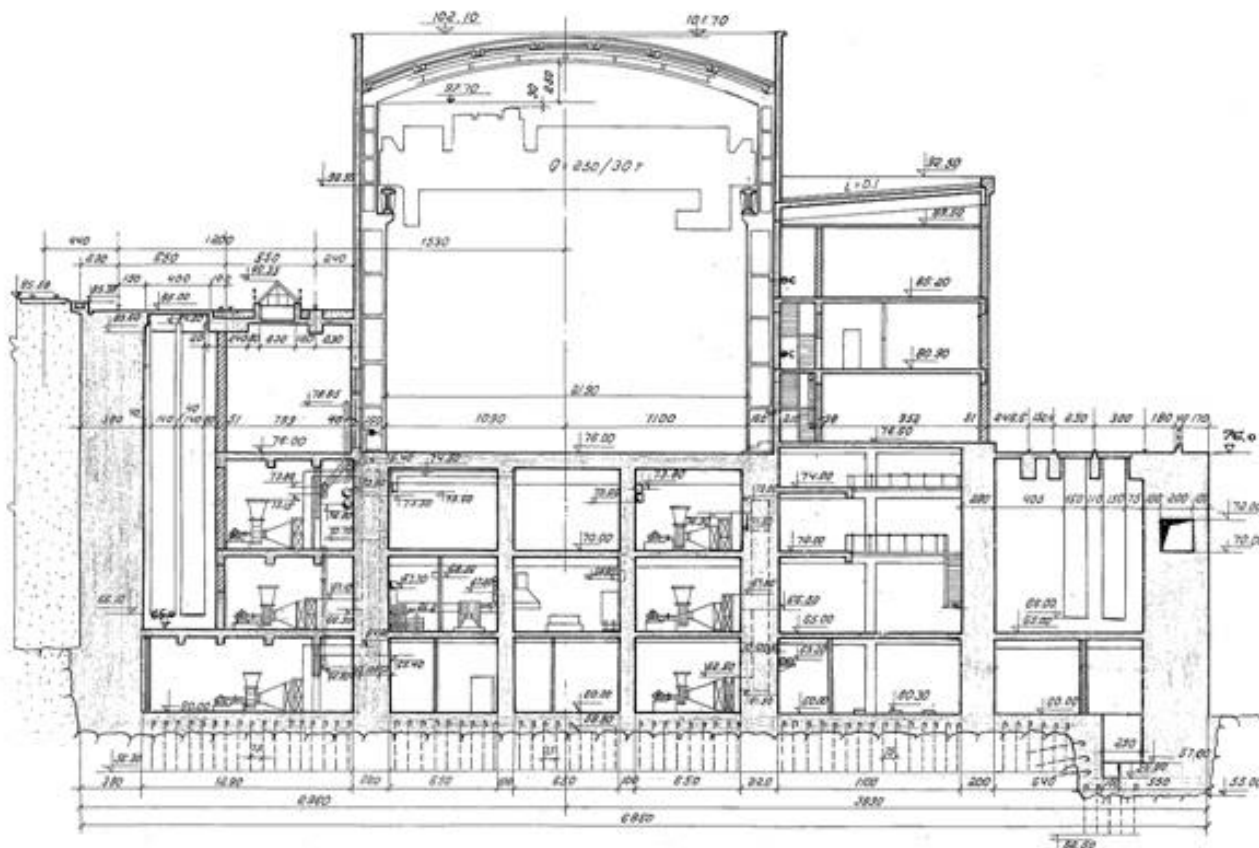


Рис. Переріз будівлі монтажного майданчика Кременчуцького гідровузла

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, ймовірність  $pZ$  позначки рівня води  $Z$ , м, перед монтажним майданчиком.

При цьому статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат  $p$ . Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [3, 6].

За значенням  $pZ$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z$ , м, перед будівлею монтажного майданчика.

У залежності від статичного рівня води  $Z$ , м, визначається середнє значення глибини води у водосховищі  $H$ , м, і глибина води у водосховищі  $H_c$ , м, перед монтажним майданчиком будівлі ГЕС.

Необхідні дані щодо характеристик водосховищ Дніпровського каскаду містяться у [24].

У залежності від середньої глибини води у водосховищі  $H$ , м, визначається довжина розгону хвилі  $L$ , м, за відомою методикою, наведеною у [25, 26], а також топографічними характеристиками водосховища.

У залежності від довжини розгону хвилі  $L$ , м, глибини води у водосховищі  $H_c$ , м, перед греблею і швидкості вітру  $V$ , м/с, визначається висота вітрового нагону  $dh$ , м, середня висота хвилі  $h_{cp}$ , м, висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль  $h_{1\%}$ , м.

Визначається хвильовий тиск при максимальному значенні горизонтального



хвильового навантаження, а також максимальне значення горизонтального хвильового навантаження.

Визначається підвищення вільної поверхні хвилі і будується епюра хвильового тиску при максимальному значенні горизонтального хвильового навантаження.

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

Визначаються випадкові величини: сила тиску води з боку верхнього  $W_{ВБ}$ , кН, і з боку нижнього б'єфів  $W_{НБ}$ , кН, з боку шлюзу  $W_{Ш}$ , кН, і будівлі ГЕС  $W_{ГЕС}$ , кН, а також сила повного протитиску води  $G_W = 298,92$  МН.

Визначаються сила тиску ґрунту засипки з боку верхнього і нижнього б'єфів, з боку шлюзу, як тиск ґрунту у стані спокою.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 ймовірність щільності ґрунту засипок  $\rho_{\rho g}$ , що примикають до монтажного майданчика будівлі ГЕС, за якою визначається квантиль – значення щільності ґрунту  $\rho_g$ .

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 ймовірність коефіцієнта внутрішнього тертя  $\rho_{tg\phi g}$ , за якою обчислюється квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\phi_g$ .

За значеннями  $\rho_g$  і  $tg\phi_g$  визначається сила бічного тиску ґрунту засипок на будівлю монтажного майданчика ГЕС.

Визначаються навантаження (детерміністичні величини) на будівлю монтажного майданчика від ваги механізмів, ваги мосту, корисного навантаження.

На території України землетруси відбуваються внаслідок сейсмічної активності у зонах осередків землетрусів 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, поданими у роботі [28].

Під час виконання кожного статистичного випробовування, урахувуючи статистичну незалежність осередків землетрусів, задаються випадкові щорічні ймовірності сейсмічних впливів  $pJr$ , розподілені від 0 до 1 у зонах осередків землетрусів Карпат, Вранча, Криму. За значенням  $pJr$  визначаються квантилі – бальність землетрусів  $Jr$ , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів для району розташування гідровузла й обирається найбільше значення для цього гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування будівлі ГЕС за рекомендаціями [29].

Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $Jr$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за розрахунковий термін експлуатації.

Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи  $\alpha_0$  (у частках  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за призначений термін експлуатації.

Сейсмічний вплив на будівлю ГЕС визначається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, розподілені по об'єму споруди, сейсмічний гідродинамічний тиск води на поверхню споруди, гідродинамічний тиск від сейсмічних хвиль, які виникають на поверхні водосховища при землетрусах.

Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [30] визначено за статичною теорією сейсмостійкості, згідно з якою споруда вважається такою, що не деформується, а під час землетрусу коливається із тими ж параметрами, що і ґрунт основи. Коефіцієнт динамічності прийнято 1,5.

Імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН, будується в залежності від розрахункової амплітуди прискорення основи  $\alpha_0$  (у частках  $g$ ) будівлі ГЕС Кременчуцького гідровузла.

Імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродинамічної сили тиску води  $E_{psg}$ , кН, будується в залежності від розрахункової амплітуди прискорення основи  $\alpha_0$  (у частках  $g$ ) будівлі ГЕС Кременчуцького гідровузла і визначається сейсмічний гідродинамічний тиск води.

У відповідності 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  $m_{tg\varphi} = 0,7$ ,  $m_c = 100$  кПа, середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi} = 0,0854$ ,  $\sigma_c = 12,2$  кПа, коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c} = 0,937$ .

Також визначено кореляційний момент  $K_{tg\varphi c} = 0,975$ . Коефіцієнт варіації прийнято  $C_v = 0,122$ .

Задається випадкова ймовірність 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  $tg\varphi$  за формулами:

$$m_{tg\varphi c} = m_c + r_{tg\varphi c} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_{tg\varphi}} \cdot (tg\varphi - m_{tg\varphi}) \quad (6)$$

$$\sigma_{tg\varphi c} = \sigma_c \cdot \sqrt{1 - r_{tg\varphi c}^2} \quad (7)$$

Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$ . За відомою

ймовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ , кПа.

Розглядається схема плоского поступального зсуву по горизонтальній поверхні. Визначаються рівнодіючі вертикальних сил  $V$  і  $W$ , горизонтальних сил  $F$ , що діють на монтажні майданчики будівлі ГЕС. При цьому враховуються як випадкові, так і детерміністичні навантаження. Отримані вище величини підставляються у рівняння зв'язку (3), (4).

За п. 7-9 наведеного методу визначається ризик виникнення аварії впродовж призначеного строку служби і за формулою (5) щорічний ризик виникнення аварії.

Результати розрахунків ризику втрати стійкості будівель монтажних майданчиків гідровузлів Дніпровського каскаду наведені в таблиці.

Необхідна кількість статистичних випробувань перебуває у межах довірчого інтервалу, межі інтервалу обчислюються за формулами [33].

**Висновок з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Удосконалено методику оцінки надійності монтажних майданчиків за критерієм втрати стійкості проти зсуву і спливання. Ураховано ймовірнісний характер навантажень і впливів з урахуванням кореляційних залежностей між ними, імовірнісний характер механічних властивостей основи. Методика апробована на будівлях монтажних майданчиків гідровузлів Дніпровського каскаду. Результати можуть застосовуватись при ймовірнісних розрахунках надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів.

Таблиця

Результати розрахунків ризику втрати стійкості на зсув і спливання монтажних майданчиків будівель ГЕС гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас споруди	Кількість статистичних випробовувань	Розрахункове значення ризику втрати стійкості, рік <sup>-1</sup>	Довірчий інтервал, рік <sup>-1</sup>	Допустиме значення ризику втрати стійкості, рік <sup>-1</sup>
Монтажний майданчик Київського гідровузла (на зсув)				
СС2-1	$3,63 \times 10^4$	$4,83 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-5} - 5,07 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4}$
Монтажний майданчик Київського гідровузла (на спливання)				
СС2-1	$1,4 \times 10^{11}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$1,06 \times 10^{-8} - 1,14 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-4}$
Монтажний майданчик Канівського гідровузла (на зсув)				
СС2-1	$1,18 \times 10^7$	$2,52 \times 10^{-6}$	$2,39 \times 10^{-6} - 2,65 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
Монтажний майданчик Кременчуцького гідровузла (на зсув)				
СС3	$5,62 \times 10^5$	$2,65 \times 10^{-5}$	$2,51 \times 10^{-5} - 2,78 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
Монтажний майданчик Дніпродзержинського гідровузла (на зсув)				
СС2-1	$6,16 \times 10^5$	$4,84 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-5} - 5,04 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4}$
Монтажний майданчик Каховського гідровузла (на зсув)				
СС3	$8,4 \times 10^5$	$1,77 \times 10^{-5}$	$1,68 \times 10^{-5} - 1,86 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$

### 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. 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.
4. 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.
5. Мозговий, А. О. Загальні підходи щодо керування ризиком втрати надійності каскаду гідровузлів під час проходження катастрофічного паводку [Текст] / А.О. Мозговий // Науковий вісник будівництва: матеріали VI Міжнародної наукової конференції “Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд”. – Харків: ХНУБА, 2013. – Вип.73. — С. 531-536.
6. Вайнберг, А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений [Текст] / А. И. Вайнберг. — Харьков: Тяжпроматоматика, 2008. — 304 с.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Voccotti, P. Risk analysis of spillway design floods [Text] / P. Voccotti, R. Rosso // Proc. of the Int. Conf. on Safety of Dams. — Coimbra: 1984. — P. 85-92.
14. Bowles, D. S. A comparison of methods for integrated risk assessment of dams [Text] / D. S. Bowles // Engineering Reliability and Risk Analysis in Water Resources. — 1987. — Nijhoff Publishers, Series E, 124. — P. 147-173.
15. Bury, K. V., Kreuzer H. Assessing the failure probability of gravity dams [Text] / K. V. Bury, H. Kreuzer // Int. Water Power and Dam Construction. — 1985. — №11. — P. 34-50.
16. Bury, K. V. The assessment of risk for a gravity dams [Text] / K. V. Bury, H. Kreuzer // Int. Water Power and Dam Construction. — 1986. — No. 12. — P. 36-40.
17. Chowdhary, R. N. Probabilistic Model of Progressive Failure of Slope [Text] / R. N. Chowdhary, D. Grivas // Proc. ASCE. J. Geotechn. Engng. Div. — 1986. — Vol. 108, GT6. — P. 803-819.
18. Douglas, K. Analysis of concrete and masonry dam incidents [Text] / K. Douglas, M. Spannagle, R. Fell // Hydropower & Dams. — 1999. — Issue 4. — P. 108-115.
19. Lemperiere, F. Risk analysis: what sort should be applied and to which dams? [Text] / F. Lemperiere // Hydropower & Dams. — 1999. — Issue 4. — P. 128-132.
20. McDonald, L. A. The status of risk assessment. Australia. In: Risk-based dam safety evaluations. Workshop report. Part one [Text] / L. A. McDonald // Hydropower & Dams. — 1998. — Issue One. — P. 89-97.
21. Пособие к СНиП 2.06.01-86. П-884-91. Проектирование зданий ГЭС и ГАЭС. Расчеты и конструирование [Текст] / ГПИО "ЭНЕРГОПРОЕКТ" Минэнерго и электрификации СССР. — М.: ВНИИО "ГИДРОПРОЕКТ" им. С.Я. Жука, 1991. — 146 с.
22. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность [Текст] / А. Р. Ржаницын. — М.: Стройиздат, 1978. — 239 с.
23. Мозговий, А.О. Аналіз статистичних даних вітрових впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу вітрових впливів за статистичними даними [Текст] / А.О. Мозговий // 36. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. — Харків: УкрДАЗТ, 2011. — Вип. 127, ч. 1. — С. 171-175.
24. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду [Текст] / А.В. Яцик, А.І. Томільцева, М.Г. Томільцев та ін. — К.: Генеза, 2003. — 176 с.
25. СНиП 2.06.04-82\*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) [Текст]. — М.: Госстрой СССР, 1989. — 71 с.
26. Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновых, ледовых и от судов) [Текст] / ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. — Л.: Типография ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1977. — 316 с.
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., (1985), "Evaluating Seismic Risk In Engineering Practice", Proc., Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Fransisco, Vol. 1, pp. 255-320.

29. Будівництво у сейсмічних районах України [Текст]: ДБН В.1.1-12:2014. – К.: Мінрегіон України, Державне підприємство "Укравхбудінформ", 2014. — 110 с.

30. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений. Пособие к разд. 5 [Текст]: 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. : ЦИТП Госстроя СССР, 1988. — 48 с.

32. Проектирование оснований гидротехнических сооружений [Текст]: пособие к СНиП II-16-76. П 13-83. — Л. : 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.: Высш. шк., 1998. – 576 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор О.І. Вайнберг

---

Мозговий Андрій Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057)706-18-99. +380507490304. 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 16.05.2016 р.

**УДК 624.074**

### **РАБОТА ОПЕРТОЙ ПО КОНТУРУ ЯЧЕЙКИ ПЕРЕКРЫТИЯ, СОСТАВЛЕННОЙ ИЗ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОЧНЫХ ПЛИТ**

Д-р техн. наук В. С. Шмуклер, кандидаты техн. наук Е. Г. Стоянов, П. А. Резник, асп. А. В. Набока (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова)

### **РОБОТА ОПЕРТОЇ ПО КОНТУРУ ЧАРУНКИ ПЕРЕКРИТТЯ, ЩО СКЛАДАЄТЬСЯ ЗІ ЗБІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКОВИХ ПЛИТ**

Д-р техн. наук В. С. Шмуклер, кандидати техн. наук Є. Г. Стоянов, П. А. Резник, асп. А. В. Набока (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова)

### **OPERATION OF FLOORING CELL, MADE OF REINFORCED CONCRETE BEAM SLABS AND SUPPORTED ALONG FOUR SIDES**

Doct. of techn. sciences V.S. Shmucler, doct. of techn. sciences E.G. Stoyanov, doct. of techn. sciences P.A. Reznik, A.V. Naboka

*Предлагается вариант компоновки перекрытия из сборных пустотных железобетонных плит, позволяющий вместо традиционной балочной конструктивной схемы работы отдельной плиты в составе перекрытия принять конструктивную схему работы нескольких плит в составе диска перекрытия. Данный вариант компоновки*

позволяет уменьшить действующие усилия в перекрытии. Приведенные результаты расчетов и их сравнение по аналитической и численной (МКЭ) методикам.

**Ключевые слова:** сборные железобетонные пустотные плиты, канатная арматура, совместная работа, аналитические методы, МКЭ, диск перекрытия.

*Пропонується варіант компонування перекриття зі збірних пустотних залізобетонних плит, що дає змогу замість традиційної балкової конструктивної схеми роботи окремої плити у складі перекриття прийняти конструктивну схему роботи декількох плит у складі диска перекриття. Цей варіант компонування дає змогу зменшити діючі зусилля в перекритті. Наведені результати розрахунків і їх порівняння за аналітичною та числовою (МСЕ) методиками.*

**Ключові слова:** збірні залізобетонні пустотні плити, канатна арматура, спільна робота, аналітичні методи, МСЕ, диск перекриття.

*We offer to construct flooring from reinforced concrete precast hollow slabs that ensures structural design of several slabs within floor slab instead of convenient beam-type structural design of separate slab within the flooring. Thus, we have quasi-contour design of operation of flooring slab. Flooring, consisting of several beam slabs within flooring cell in question, has finite bending stiffness in longitudinal direction that depends on geometrical and physical-mechanical parameters and also reinforcement of each separate slab. In transverse direction composite flooring slab has almost zero bending stiffness and bears load due to shear rigidity of the joint and torsion resistance of each slab. This arrangement reduces loads, applied to flooring slab. Represented results of calculations and their comparison by analytical and numerical methods (FEM).*

**Key words:** Reinforced concrete precast hollow slabs, fore-rope fittings, joint operation, analytical methods, FEM, flooring slab.

**Вступление.** Экономическая эффективность применения того или иного типа железобетонной конструкции напрямую связана с расходом материалов, в особенности, если речь идет о дорогостоящей высокопрочной арматуре.

Так, для сборных предварительно напряженных плит безопалубочного стендового формования с канатной рабочей арматурой вопрос экономии арматуры является одним из основных при проектировании. За счет применения бетонов повышенной прочности (С30/35 и выше) удалось избежать применения рабочей поперечной арматуры и всех видов конструктивной арматуры [1]. Еще больший эффект следует ожидать от экономии рабочей арматуры.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с научными и практическими задачами.** Ощутимый эффект

при применении сборных предварительно напряженных плит перекрытий возможен при экономии рабочей канатной арматуры. При этом требования к прочности, трещиностойкости и деформативности не снижаются [2,3].

Проблема использования минимально возможного количества рабочей арматуры для заданных нагрузок на перекрытиях является приоритетной задачей для практики строительства зданий и сооружений.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Сокращение расхода рабочей арматуры в элементах перекрытий возможно за счет перехода от конструктивной схемы работы каждой отдельной плиты балочного типа к совместной работе сборных плит в составе диска перекрытия.

Преимущества работы плит в составе диска рассматривались как ранее [4, 5, 8], так и в последнее время. При этом рассматривались различные конструктивные схемы сборных дисков (с опиранием на жесткий или податливый контур, с опиранием плит друг на друга по этажной схеме, с соединением плит между собой с помощью закладных деталей в отдельных точках или сплошным продольным швом [4,9], с устройством надбетонки над пустотными плитами [10] и др.). Определенный интерес представляют композитные железобетонные плиты, в которых в качестве вкладышей применены микрокапсулы РСМ, которые адаптируются к температурному режиму и имеют потенциал в энергосбережении [11].

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящего исследования является минимизация расхода арматуры в предварительно напряженных многопустотных плитах перекрытий.

При исследовании ставится задача разработки конструкции диска перекрытия, составленного из сборных предварительно напряженных многопустотных плит, и методики определения его напряженно-деформированного состояния при различных схемах компоновки перекрытия и разных нагрузках.

**Основная часть исследования.** В предлагаемом варианте диск формируется из балочных плит, соединенных друг с другом по боковым поверхностям с помощью специального шва, исключающего взаимные сдвиги плит в вертикальной плоскости (рис. 1).

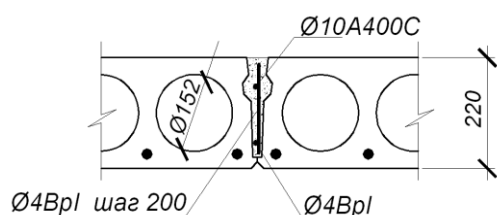


Рис. 1. Конструкция шва между плитами

При этом крайние плиты ячейки перекрытия обязательно опираются боковой кромкой на несущие стены или ригели.

При такой конструктивной схеме ячейка перекрытия работает в двух направлениях, за счет чего в продольном направлении каждой плиты в определенной степени уменьшаются изгибающие моменты.

Таким образом, мы получаем квазиконтурную схему работы плиты-диска перекрытия. Такая составная плита, состоящая из нескольких балочных плит, в пределах рассматриваемой ячейки перекрытия, в продольном направлении имеет конечную изгибную жесткость, зависящую от геометрических и физико-механических параметров, а также от армирования каждой отдельной плиты. В поперечном направлении составной диск имеет практически нулевую изгибную жесткость, а нагрузку воспринимает за счет сдвиговой жесткости шва и сопротивления каждой плиты кручению.

Характер передачи нагрузки и соответствующая схема работы диска в поперечном направлении зависит от количества плит в ячейке.

Так, например, для ячейки перекрытия из двух плит (рис. 2) каждая из них в произвольном сечении испытывает погонный крутящий момент, кНм/м,

$$T = T_{(2)} = qb^2 / 2. \quad (1)$$

От крутящего момента в поперечном сечении плита поворачивается на угол  $\varphi$ , определяемый по формуле

$$\varphi = \frac{T}{GI_k} f(x), \quad (2)$$

где  $f(x)$  – функция изменения угла поворота по длине плиты;

$G$  – модуль сдвига бетона, принимаемый как  $G = 0.4E_{cm}$ ;

$I_k$  – крутильный момент инерции сечения плиты.

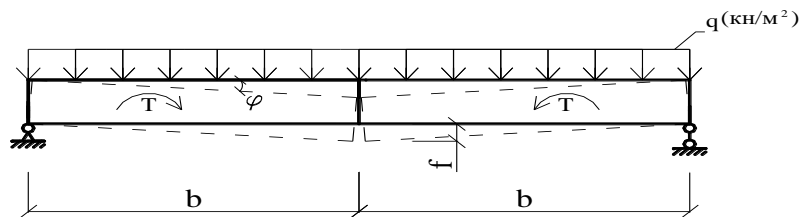


Рис. 2. Схема работы диска из двух плит

При определении крутильного момента инерции фактическое сечение многопустотной плиты приводится к пустотелому коробчатому сечению с условной эффективной толщиной стенок  $t_{ef}$  [6].

При равномерно распределенной нагрузке на всей площади рассматриваемой ячейки перекрытия функцию  $f(x)$  логично принять идентичной функции изменения изгибающего момента по длине плиты. При этом максимальный угол поворота в центре ячейки перекрытия

$$\varphi_0 = \frac{T}{GI_k} \int_0^L \left( x - \frac{x^2}{L} \right) dx = \frac{TL^2}{6GI_k}. \quad (3)$$

При угле поворота сечения в центре продольного шва между плитами, равном  $\varphi_0$ , прогиб в центре диска составляет

$$f = b \cdot \text{tg} \varphi_0 = b \cdot \varphi_0. \quad (4)$$

Погонный максимальный изгибающий момент в продольном направлении в шве между плитами при равномерно распределенной нагрузке

$$M_x = 48E_{cm}I_z f / 5l^2. \quad (5)$$

Для ячейки перекрытия, состоящей из трех плит, расчетная схема может быть представлена как показано на рис. 3, где распределенная нагрузка от средней плиты

частично распределяется на изгиб плиты как балочной  $q_1$ , а частично  $(q - q_1)$  передается на крайнюю плиту в виде погонной линейной силы  $P_1 = (q - q_1) \cdot b/2$ , вызывающей дополнительный прогиб крайней плиты от поворота сечения. При этом крутящий момент в крайней плите

$$T_{(3)} = T_{(2)} + P_1 b = qb^2 - q_1 b^2 / 2, \quad (6)$$

угол поворота крайней плиты

$$\varphi_0 = \frac{b^2 L^2}{6GI_k} (q - q_1 / 2), \quad (7)$$

прогиб крайней плиты

$$f_{кр} = b \varphi_0 = \frac{b^3 L^2}{6GI_k} \left( q - \frac{q_1}{2} \right). \quad (8)$$

Прогиб средней плиты от ее изгиба по балочной схеме

$$f_{ср} = \frac{5}{384} \frac{q_1 b L^4}{E_{cm} I_z}. \quad (9)$$

Приравнявая  $f_{кр} = f_{ср}$ , получим

$$q_1 = \frac{\frac{qb^2}{6GI_k}}{\left( \frac{5L^2}{384E_{cm}I_z} + \frac{b^2}{12GI_k} \right)}. \quad (10)$$



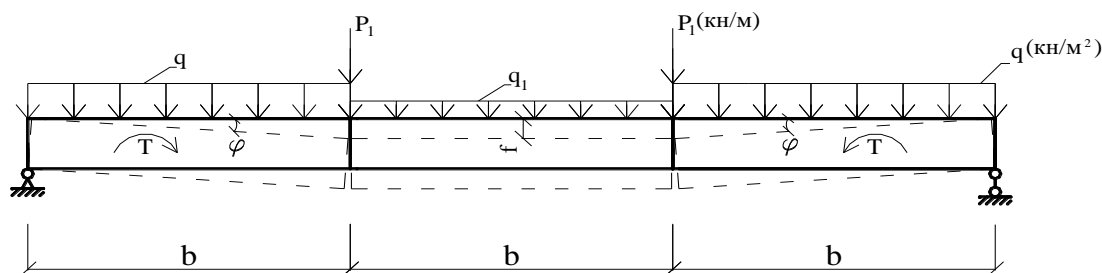


Рис. 3. Расчетная схема работы диска из трех плит

Максимальный прогиб средней плиты при трех плитах в ячейке диска

$$f_{(3)} = \frac{5q_1 b L^4}{384 E_{cm} I_z}, \quad (11)$$

и соответствующий балочный момент в плите, работающей в составе диска,

$$M_\delta = q_1 b L^2 / 8. \quad (12)$$

Отношение момента при балочной схеме работы плиты  $M_l$  к моменту при работе плиты в составе диска  $M_\delta$   $n = M_l / M_\delta$  является показателем эффективности работы диска перекрытия.

Экспериментальные исследования работы плит в составе диска перекрытия [7] показали, что при всех возможных схемах нагружения максимальные прогибы имеют место при полной нагрузке на всех плитах диска. При этом должна быть обеспечена прочность шва между плитами при разной нагрузке на смежных плитах [8].

Для ячейки перекрытия, состоящей из четырех плит, расчетная схема может быть представлена как показано на рис. 4.

При такой схеме крутящий момент  $T_{(4)} = T_{(2)} + T_{(3)}$ ; прогиб  $f_{(4)} = f_{(2)} + f_{(3)}$ ; изгибающий момент при работе плит в составе диска  $M_\delta = 48 E_{cm} I_z f_{(4)} / 5 L^2$ .

Для ячейки из пяти плит расчетная схема представлена на рис. 5.

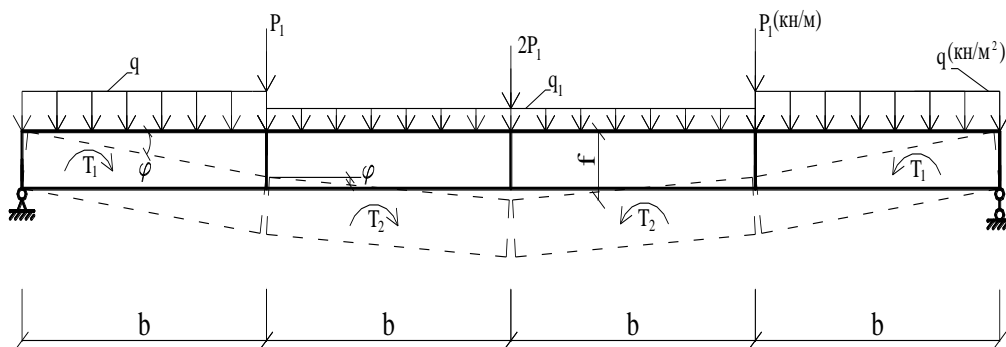


Рис. 4. Схема работы диска из четырех плит

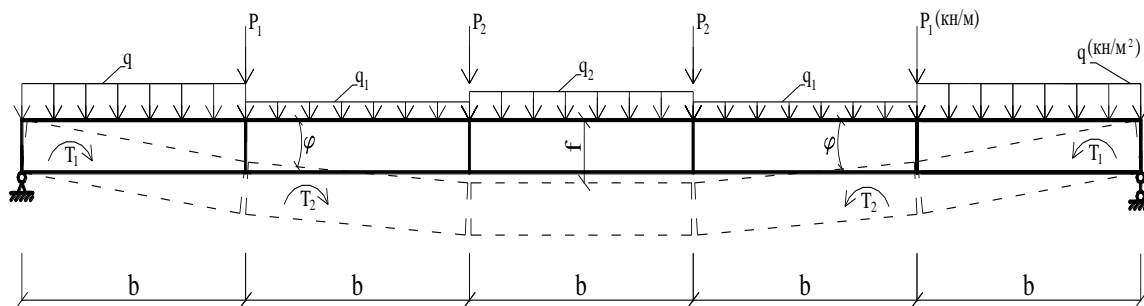


Рис. 5. Расчетная схема диска из пяти плит

При этой схеме  $T_{(5)} = T_{(4)} + P_2b$ , где

$$P_2 = P_1 + (q - q_2)b / 2, \quad (13)$$

прогиб от кручения

$$f_{(5)} = f_{(4)} + \frac{P_2 b L^2}{6GI_k}. \quad (14)$$

Приравнивая  $f_{(5)}$  с прогибом средней плиты от изгиба по балочной схеме

$$f_{cp} = \frac{5q_2 b L^4}{384E_{cm}I_z}, \quad (15)$$

получаем часть нагрузки  $q_2$ , вызывающую изгиб средней плиты при ее работе по балочной схеме. Далее по алгоритму расчета диска из трех плит определяем  $M_d$  в средней плите.

При любом четном количестве плит в ячейке перекрытия расчетные схемы аналогичны представленной на рис. 4, при любом нечетном количестве плит – аналогичны представленной на рис. 5.

Для перехода от дискретно-континуальной модели ячейки плиты перекрытия к дискретной, с возможностью варьирования геометрическими и физико-механическими параметрами плит, а также

равномерно распределенной нагрузкой, построена конечно-элементная модель сборного железобетонного диска перекрытия с шарнирным опиранием по всем четырем сторонам. Диск смоделирован из прямоугольных КЭ №11, размер элементов 0,2x0,2 м. Продольные швы между плитами моделируются путем расшивки узлов и объединения перемещений по вертикальной оси Z.

Для расчета конструкций использовался программный комплекс ЛИРА-САПР 2013.

В качестве примера рассмотрена ячейка перекрытия размерами в плане 3,6x7,2 м, составленная из трех плит шириной 1200 мм, высотой 220 мм. Плиты имеют по шесть пустот диаметром 152 мм. Плиты изготовлены предварительно напряженными из бетона класса С32/40, запроектированы под расчетную нагрузку (сверх собственного веса) 8,0 кН/м<sup>2</sup>.

Для модели использовано 777 узлов и 648 элементов КЭ №11.

Для сравнения результатов расчета параллельно рассматривались еще две модели:

- отдельная железобетонная плита, опертая шарнирно по коротким сторонам;
- монолитная железобетонная плита эквивалентной изгибной жесткости, опертая шарнирно по контуру, с размерами данной ячейки перекрытия.

В результаті розрахунків побудовані ізополя і епюри изгибающих моментов  $M_x$  (вдоль длины плит), изгибающих

моментов  $M_y$  в среднем сечении ячейки и вертикальных перемещений (рис. 6-11).

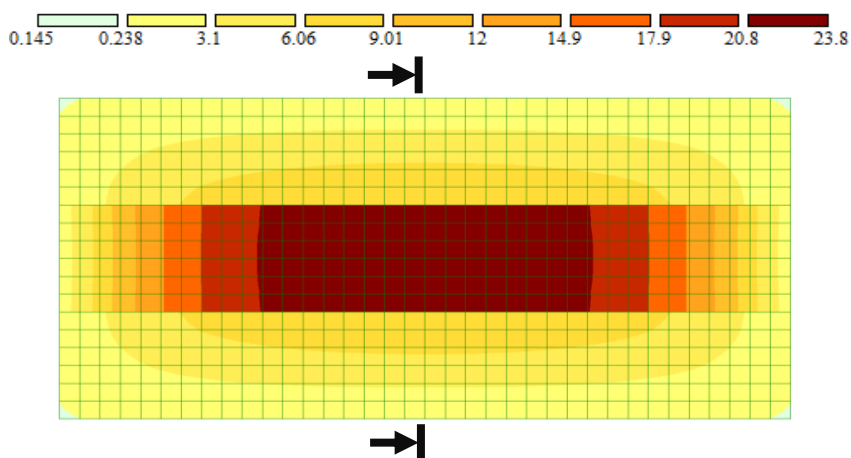


Рис. 6. Изополя изгибающих моментов  $M_x$ , кНм/м

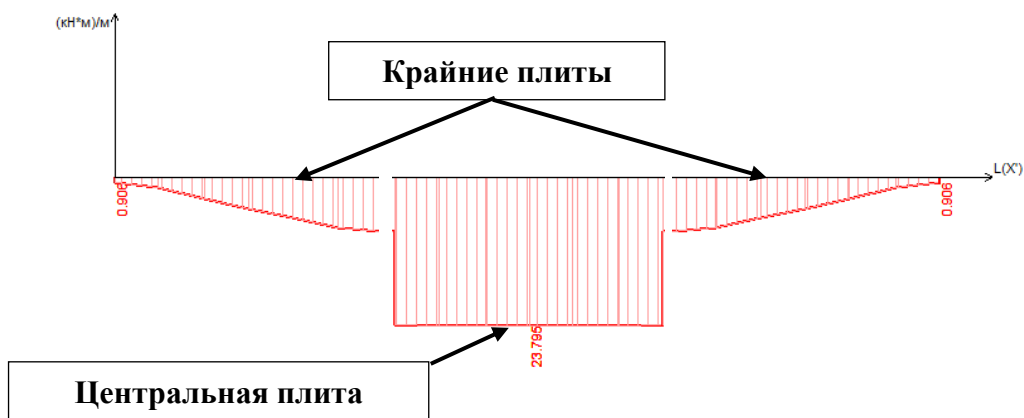


Рис. 7. Эпюра изгибающих моментов  $M_x$  (кНм) в среднем сечении ячейки перекрытия

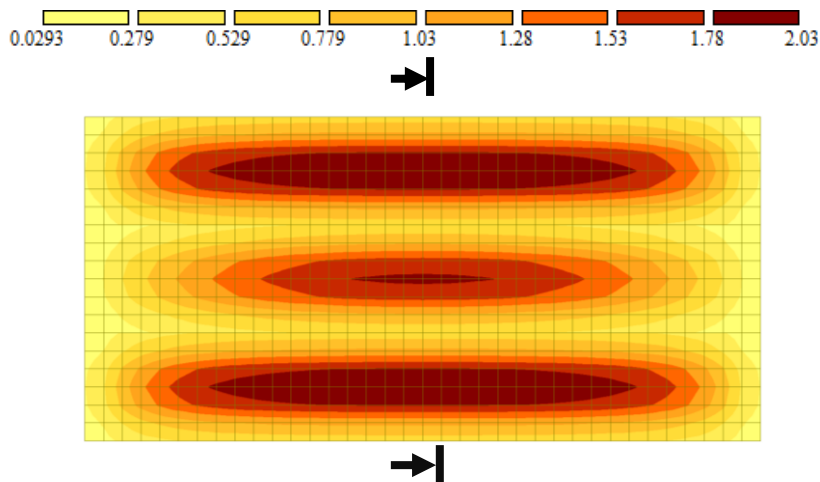


Рис. 8. Изополя изгибающих моментов  $M_y$ , кНм/м

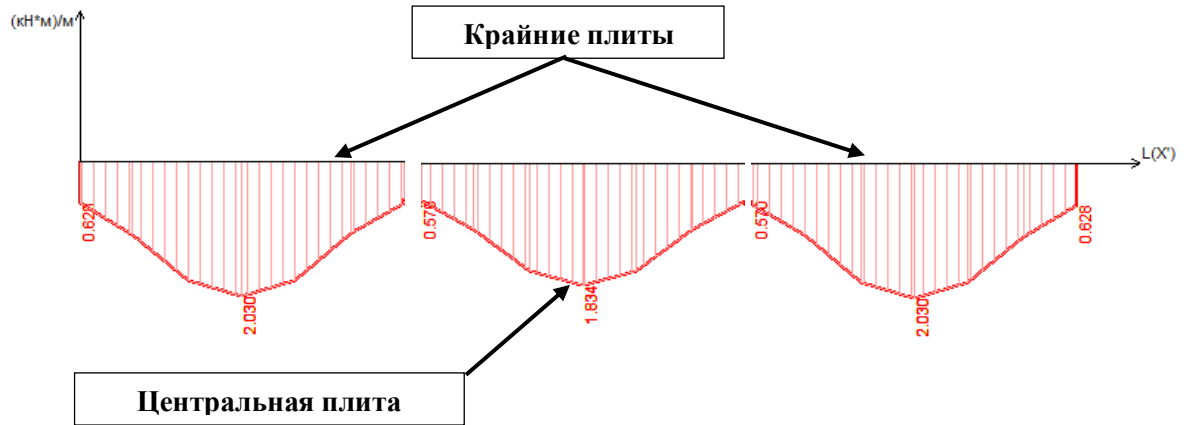


Рис. 9. Эпюра изгибающих моментов  $M_y$ ,  $\text{kNm}$ , в среднем сечении ячейки перекрытия

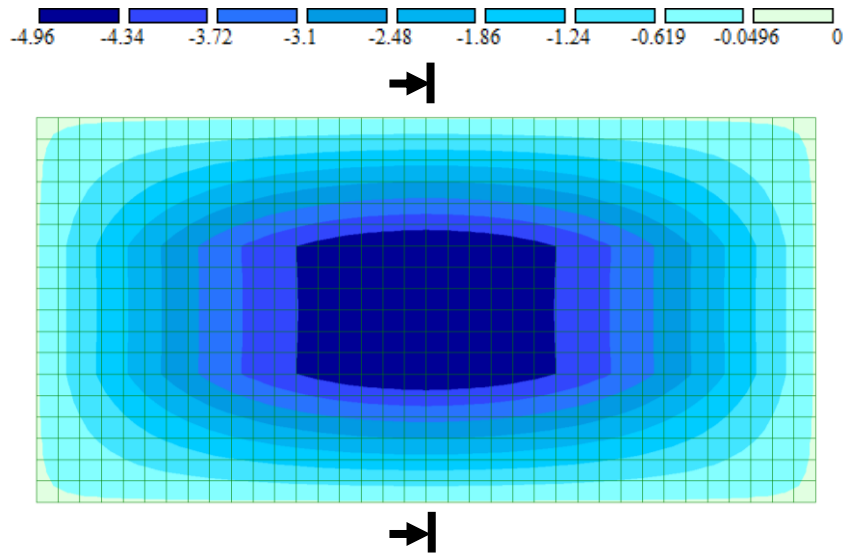


Рис. 10. Изополя вертикальных перемещений  $Z$ , мм

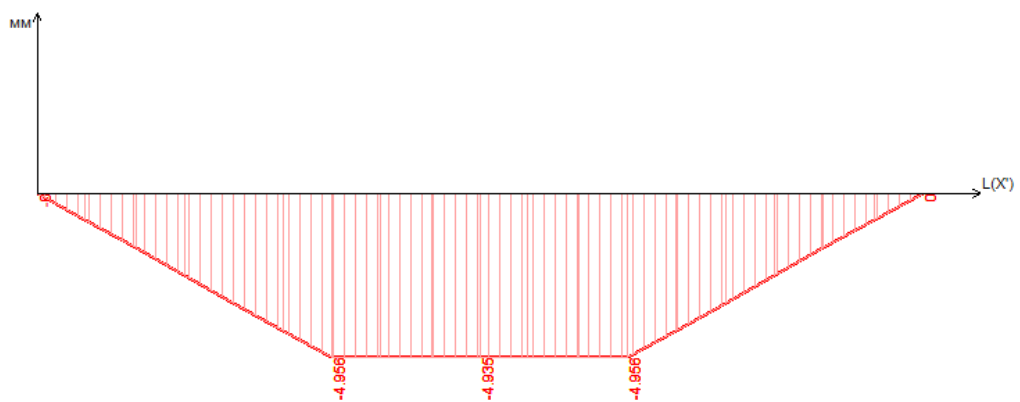


Рис. 11. Эпюра вертикальных перемещений в среднем сечении плит, мм

Сравнение результатов расчета по дискретной и дискретно-континуальной моделям показало достаточную степень совпадения для всех параметров

напряженно-деформированного состояния рассматриваемой ячейки перекрытия (рис. 12).

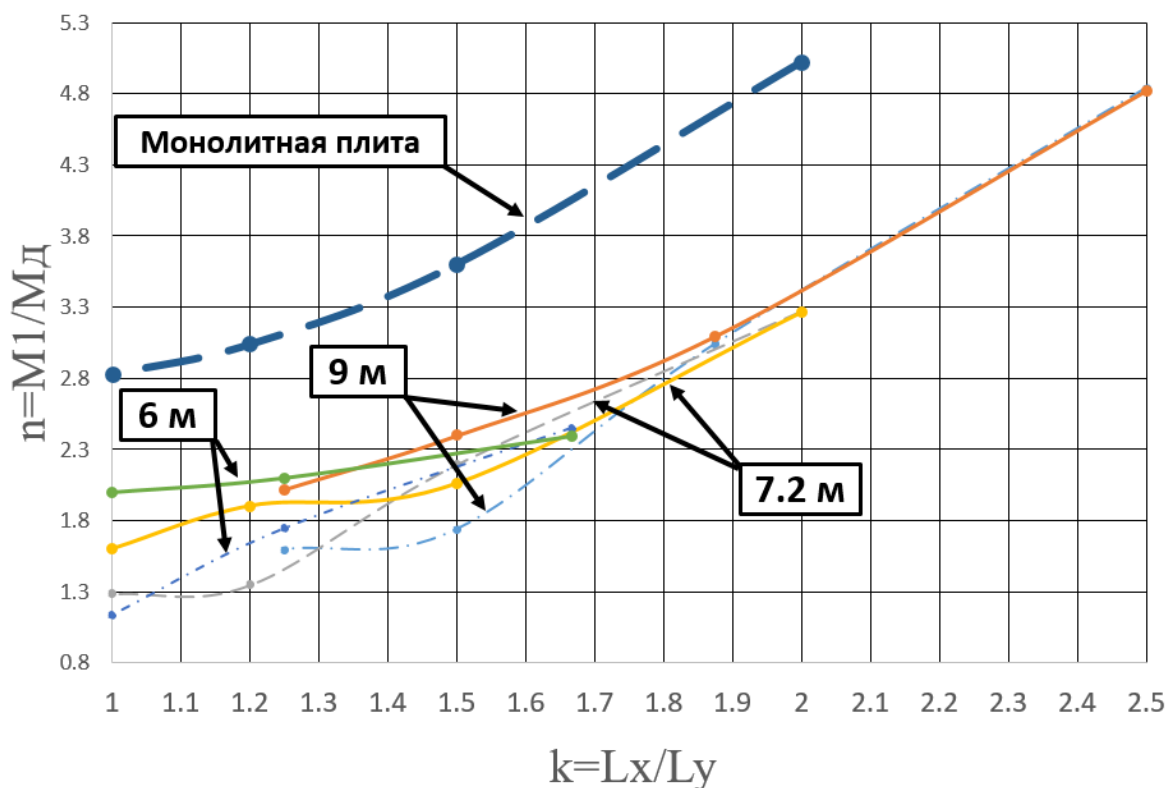


Рис. 12. График  $n-k$  изменения изгибающих моментов в диске перекрытия:

$L_x$  – длина диска (плиты);

$L_y$  – ширина диска из нескольких плит;

$M_1$  – максимальный момент в одиночной балочной плите;

$M_d$  – максимальный момент в плите в составе диска;

— · — — — результаты, полученные методом конечных элементов;

— — — — результаты, полученные аналитическим методом

По приведенному алгоритму расчета определены изгибающие моменты в ячейках диска перекрытия, составленных из 3...6 плит различной длины (6,0...9,0 м). Эффективность применения предлагаемого решения очевидна по результатам анализа результатов (таблица).

**Выводы по результатам исследования и перспективы по дальнейшему развитию данного направления**

1. Сравнение результатов аналитических расчетов и расчетов методом

конечных элементов показало достаточную степень совпадения для всех параметров напряженно-деформированного состояния в ячейках перекрытия.

2. При компоновке дисков ячеек перекрытий из фиксированного количества плит для определения их армирования принимается средняя плита с наибольшими изгибающими моментами.

3. Формирование ячеек перекрытий в виде квазисплошных дисков предполагает

возможное изменение конструктивной схемы здания в целом (применение несущих продольных и поперечных стен или ригелей двух направлений,

возможность укладки плит перекрытий в разных направлениях в пределах одного и того же этажа для обеспечения рекомендуемого соотношения  $L_x/L_y > 1$ ).

Таблица

Изгибающие моменты в сборном диске перекрытия

Длина плиты, м	Переменная расчетная нагрузка, кН/м <sup>2</sup>	Момент в балочной плите М <sub>1</sub> , кНм	Максимальный момент в центре диска М <sub>д</sub> , кНм, при ширине ячейки перекрытия, м			
			3.6	4.8	6.0	7.2
6.0	21.0	124.5	51.9	59.3	62.2	-
	16.0	98.9	41.2	47.1	49.5	-
	12.5	81.0	33.7	38.6	40.5	-
	10.0	68.2	28.4	32.5	34.1	-
	8.0	58.0	24.2	27.6	29.0	-
7.2	16.0	143.7	44.0	69.8	75.6	89.4
	12.5	117.7	36.0	57.2	62.0	73.1
	10.0	99.1	30.3	48.1	52.1	61.9
	8.0	89.2	27.3	43.3	46.9	55.8
	6.0	69.4	21.2	33.7	36.5	43.4
8.4	10.0	134.5	38.0	49.5	66.3	78.8
	8.0	121.0	34.1	44.5	59.6	71.2
	6.0	94.1	26.5	34.6	46.3	55.3
	4.5	79.0	22.3	29.1	38.9	46.5
9.0	8.0	139.4	28.9	45.0	58.1	69.0
	6.0	108.4	22.5	35.0	45.2	53.5
	4.5	91.0	18.9	29.4	37.9	45.1

**Список использованных источников**

1. Шмуклер, В. С. Особенности внедрения железобетонных многопустотных предварительно напряженных плит перекрытий безопалубочного стендового формования [Текст] / В. С. Шмуклер, Е. Г. Стоянов и [др.] // Комунальне господарство міст. – Харків, 2014. – №114. – С. 22-30.
2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009.
3. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010.
4. Шмуклер, В.С. Каркасные системы облегченного типа [Текст] / В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Буряк. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336 с.

5. Шмуклер, И.В. Сборные железобетонные диски перекрытий с рациональными поперечными связями [Текст]: дисс... канд. техн. наук / И. В. Шмуклер. – Харьков: ХГТУСА, 1995. – 324 с.
6. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В 2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84\* і EN 1992-1-1(Eurocode 2) [Текст] / В.М. Бабаєв, А.М. Бамбура, О.М. Пустовойтова [та ін.]. – Харків: «Золоті сторінки», 2015. – 206 с.
7. Стоянов, Е.Г. Экспериментальное исследование работы сборных железобетонных предварительно напряженных плит в составе диска перекрытия [Текст] / Е.Г. Стоянов, А.В. Набока // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНТУБА, 2016. – №1(83). – С. 107-114.
8. Байков, В.Н. Проектирование железобетонных тонкостенных пространственных конструкций [Текст] / В.Н. Байков, Э. Хампе, Э. Рауэ. – М.: Стройиздат, 1990. – 232 с.
9. Krzysztof Gromysz Distribution of forces in composite concrete slabs between the joint and reinforcement anchored on the support [Text] / K. Gromysz // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 65. – P. 206 – 211.
10. Eray Baran Effects of cast-in-place concrete topping of flexural response of precast concrete hollow-core slabs [Text] / E. Baran // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 98. – P. 109-117.
11. Lidia Navarro Design of prefabricated concrete slab with PCM inside the hollows [Text] / Lidia Navarro, Alvaro de Garcia, Albert Castell, Servando Alvarez, Luisa F. Cabeza // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 57. – P. 2324-2332.

---

Шмуклер Валерій Семенович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. E-mail: kname.edu.ua.

Стоянов Євген Геннадійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. E-mail: kname.edu.ua.

Резнік Петро Аркадійович, канд. техн. наук, асистент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. E-mail: kname.edu.ua.

Набока Анатолій Віталійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. E-mail: kname.edu.ua.

Shmucler Valeriy Semenovich, d-r science, professor department of building constructions. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov. E-mail: kname.edu.ua.

Stoyanov Evgeniy Genadiyovich, d-r science, docent department of building constructions. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov. E-mail: kname.edu.ua.

Reznik Petr Arcadiyevich, d-r scient, assistant department of building constructions O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov. E-mail: kname.edu.ua.

Naboka Anatoliy Vitalievich, graduate student department of building constructions O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov. E-mail: kname.edu.ua.

Стаття прийнята 17.05.2016 р.

УДК 624.012:53.09

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФУНДАМЕНТІВ КОКСОВИХ БАТАРЕЙ

Д-р техн. наук С. Л. Фомін, О. М. Кравченко (ХНУБА)

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТОВ КОКСОВЫХ БАТАРЕЙ

Д-р техн. наук С. Л. Фомин, А. М. Кравченко (ХНУСА)

## NUMERICAL SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF COKE OVEN BATTERIES FOUNDATIONS

Dr. Sciences S. Fomin, applicant A. Kravchenko

*Запропонована модернізована скінченноелементна рамна модель розрахунку фундаментів коксових батарей з боковим підведенням опалювального газу, що складається з окремих скінченних стержневих елементів СЕ різної висоти для наближення до дійсної плоскої арочної системи. Механізм моделювання на ПК Ліра розглянуто на прикладі розрахунку реконструкції фундаменту коксових батарей Алчевського КХЗ.*

**Ключові слова:** коксові батареї, рамні фундаменти, моделювання напружено-деформованого стану методом скінченних елементів, облік температурних впливів.

*Предложена модернизированная конечноэлементная рамная модель расчета фундаментов коксовых батарей с боковым подводом отопительного газа, состоящая из отдельных конечных стержневых элементов КЭ различной высоты для приближения к действительной плоской арочной системе. Механизм моделирования на ПК Лира рассмотрен на примере расчета реконструкции фундамента коксовых батарей Алчевского КХЗ.*

**Ключевые слова:** коксовые батареи, рамные фундаменты, моделирование напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов, учет температурных воздействий.

*A modernized framework finite element model is proposed for calculating the foundations of coke oven batteries with gun flue of heating gas, which is composed of finite bar elements CE that have different heights, to approximate a real flat arch system. The mechanism of simulation on PC Lyra is considered using an example of calculating the reconstruction of coke oven batteries foundation at Alchevsk By-Product Coking Plant.*

**Keywords:** coke oven batteries, frame foundations, modeling of stress-strain state using the finite element method, consideration of temperature effects.

**Вступ.** Коксовою батарею називається група коксових печей, об'єднаних спільним фундаментом, пристроями для підведення опалювальних газів і повітря, відведення продуктів згорання і коксування. Основними конструктивними елементами коксової

батарей є коксові печі, фундамент, борови, димова труба, (робочі) площадки, що обслуговують. Коксова батарея споруджується на залізобетонному фундаменті. У печах з бічним підведенням опалювального газу на нижній плиті фундаменту розташовані канали для



відведення продуктів згоряння – борови і вентиляційний канал в центрі, які об'єднані несучим залізобетонним масивом для сприйняття навантажень від кладки батареї.

За ознакою підведення опалювального газу коксові печі переважної більшості сучасних вітчизняних і зарубіжних конструкцій поділяються на такі групи: печі комбіновані і некомбіновані; печі з бічним підведенням опалювального газу та повітря і печі з нижнім підведенням [1]. Коксові печі з перекидними каналами системи ПК-2К з парними вертикалами з бічним підведенням

газу (рис. 1) мають переваги в порівнянні з печами інших систем: малим опором опалювальної системи; хорошою рівномірністю обігріву коксової камери по висоті і більш високою будівельною міцністю опалювального простінка [2]. Актуальність наукових розробок з проблеми обумовлена необхідністю вдосконалення конструктивних рішень фундаментів коксових батарей з бічним підведенням опалювального газу, як при новому будівництві, так і при реконструкції.

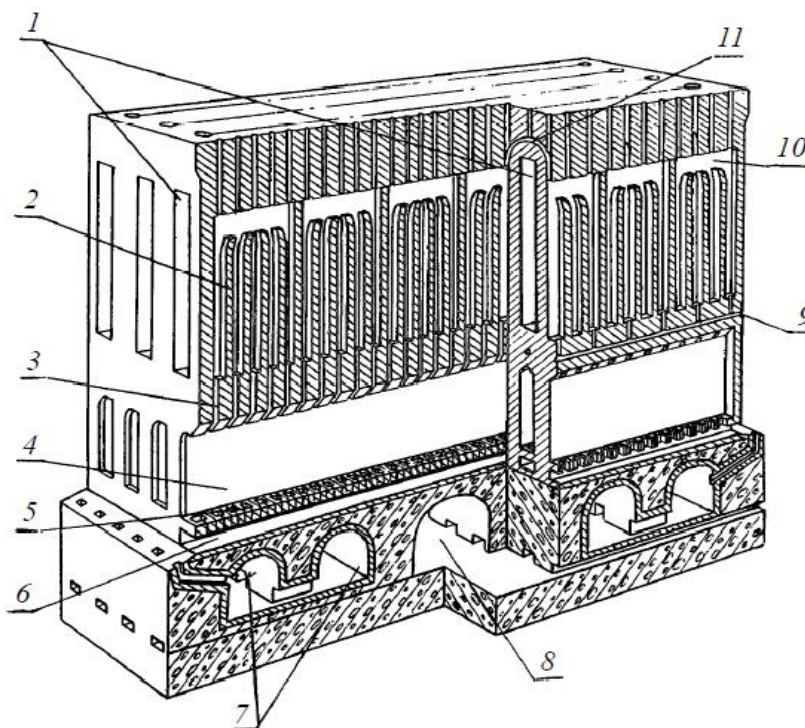


Рис. 1. Коксова піч системи ПК-2К: 1 – камера коксування; 2 – опалювальний простінок; 3 – з'єднувальний канал (косий хід); 4 – регенератор; 5 – решітка; 6 – подовий канал; 7 – борів; 8 – вентиляційний борів; 9 – газопідвідний канал (корнюр); 10 – секція горизонтального каналу; 11 – перекидний канал

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Технічні тенденції у перепроєктуванні та будівництві коксових батарей викладені в роботі [3], нелінійна модель введення-виведення для коксової батареї в [4], аналіз перенесення тепла у

фундаментах проведено в [5], розрахунок втрат тепла фундаментної плити при нерівномірних температурних профілях внутрішньої температури в [6].

Дослідження щодо конструкцій фундаментів коксових батарей (КБ) були про-

ведені Харківським ПромбунДІпроектм, НІИЖБ, Гипрококс, керуючись СНиП, і стосувалися в основному фундаментів КБ з нижнім підведенням опалювального газу та повітря. Методика розрахунку фундаментів КБ з бічним підведенням опалювального газу відсутня.

Наразі нормативна база України перейшла на європейські норми. Закінчено процес гармонізації з Єврокодами, розроблені і введені в дію нові національні нормативні документи ДБН і ДСТУ замість СНиП [7-9]. При цьому у Єврокодах не охоплений великий розділ «Бетонних та залізобетонних конструкцій, призначених для роботи в умовах підвищених і високих температур», для якого були розроблені будівельні норми і правила СНиП. У Російській Федерації проведена робота щодо актуалізації нормативної бази в цій галузі, в СП 52-101-2003 з'явилися розділи з деформаційною моделлю, проте багато чого не вистачає для коректного аналізу [10-15].

**Визначення мети та задачі дослідження.** Метою дослідження є створення методики розрахунку залізобетонних конструкцій фундаментів коксових батарей на новій нормативній базі, гармонізованій з Єврокодами, з використанням напрацювань в частині впливу нагріву на властивості матеріалів і комп'ютерних технологій.

У завдання дослідження входить визначення температурного поля при сталому режимі нагріву, чисельне моделювання зусиль і деформацій фундаментів коксових батарей при розрахунковій стрижневій схемі.

**Основна частина дослідження.** Методика розрахунку залізобетонних конструкцій фундаментів коксових батарей показана на прикладі проекту реконструкції фундаменту коксових батарей ВАТ "Алчевськкокс" КБ №10 біс. Фундамент коксової батареї з печей ємністю 35,8 м<sup>3</sup> з бічним підведенням опалювального газу та повітря подана на рис. 2.

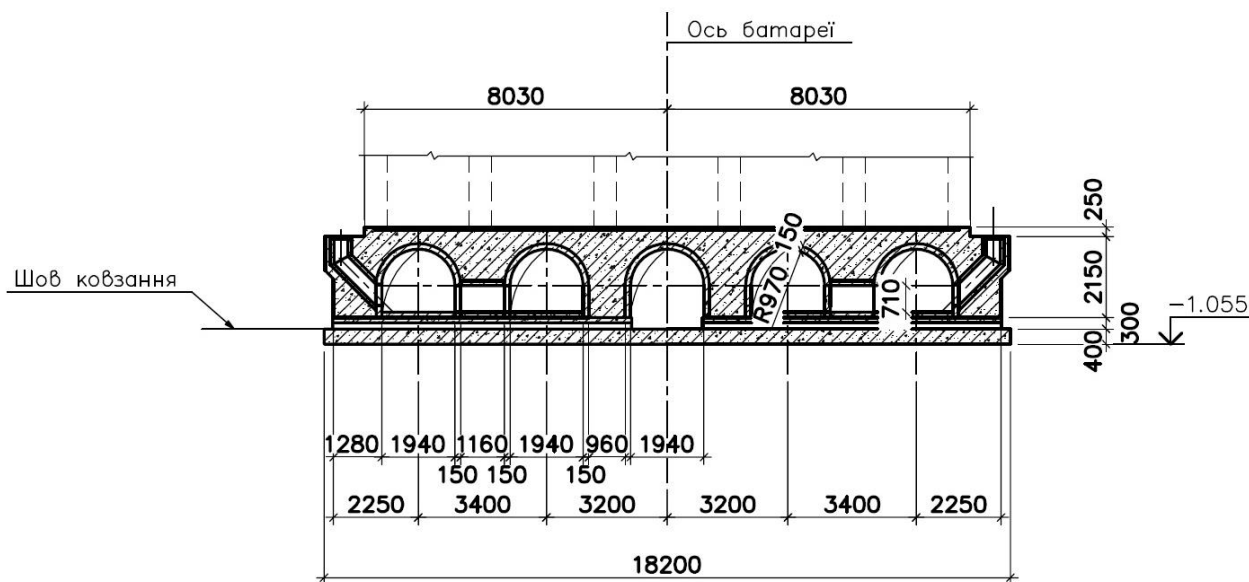


Рис. 2. Поперечний розріз фундаменту коксової батареї №10 біс ВАТ «Алчевськкокс»

При будівництві використовується нижня монолітна плита існуючого фундаменту товщиною 400 мм, шириною 18680 мм і подовжується до проектних

розмірів 84640 мм. Потім виконується вирівнюючий шар бетону товщиною близько 245 мм і шар збірних залізобетонних порожнистих блоків

заввишки 225 мм з кроком 600 мм. На фундаментній плиті споруджується монолітний залізобетонний масив висотою 2700 мм, прорізаний у подовжньому напрямку центральним вентиляційним каналом з арочним склепінням шириною 1940 мм і висотою по центру 2120 мм і чотирма (по два з кожного боку від каналу) боровами для відведення продуктів горіння шириною 2160 мм і висотою 1690 мм. У традиційному варіанті для масиву застосований жаростійкий бетон марки 200, борова футеровані вогнетривкою цеглою.

У процесі розігрівання і експлуатації вогнетривка кладка печей коксових батарей розширюється. Зростання кладки в поперечному напрямку пружно стримується анкерною системою, що складається з металевих анкерних колон, сталевих стяжок і пружин, встановлених з машинного і коксового боків батареї. У подовжньому напрямку для цієї мети передбачені контрфорси.

Для зниження температурних зусиль, що розвиваються в процесі розігріву коксових батарей і при їх охолодженні, між кладкою і фундаментом передбачений шов ковзання. Такий же шов ковзання влаштовується між масивом фундаменту і нижньою фундаментною плитою. Задання температурного впливу при сталому періоді нагріву наведено на рис. 3.

Нижня поверхня фундаменту і відповідно верхня поверхня нижньої фундаментної плити нагріваються менше в результаті системи охолодження, що включає пристрій поперечних каналів між фундаментною плитою і тілом масиву, по яких повітря надходить з тунелів, розміщених за межами фундаменту, в центральний вентиляційний канал, нагрівається, відбирає тепло з нижніх частин фундаменту і віддається по витяжних трубах, розташованих у контрфорсах.

Визначення температурного поля при сталому режимі нагріву проведено в роботі [16].

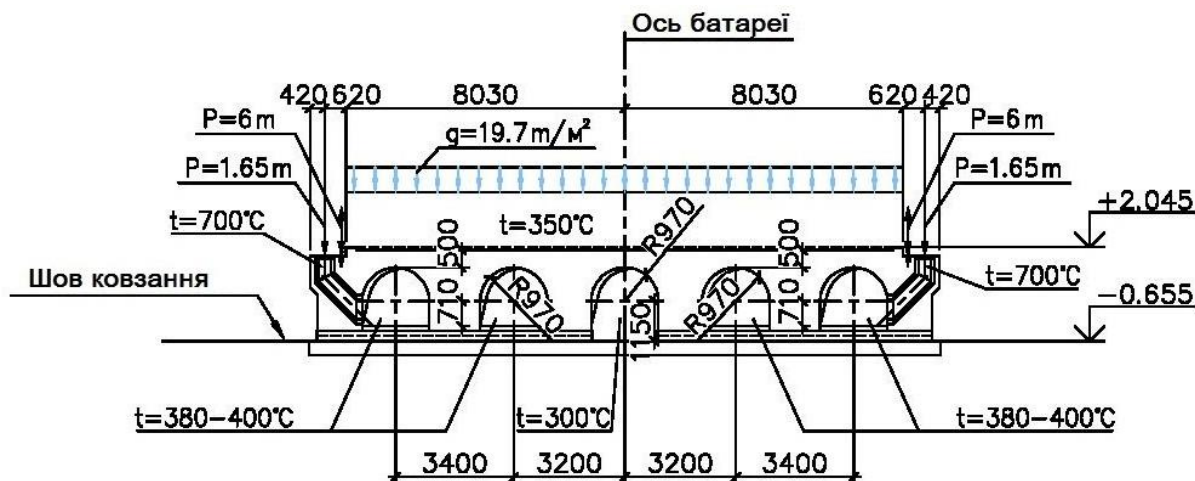


Рис. 3. Схема навантажень на фундамент коксової батареї №10 біс ВАТ «Алчевськкокс»

**Чисельне моделювання напружено-деформованого стану фундаменту коксових батарей за розрахунковою стрижневою схемою.** Розрахунок фундаментів коксових батарей з бічним

підведенням опалювального газу та повітря в проектній практиці проводиться за стрижневою рамною схемою. Навантаження від ваги кладки, анкерних пристроїв і механізмів прикладаються до

елементів п'ятипрольотної одноповерхової рами відповідно до завдання. Температурний вплив задається в стрижнях рами температурами їх бічних поверхонь. При цьому не враховується нерівномірний розподіл температур по перерізу елементів. В результаті розрахунку виявляються температурні зусилля - згинальні моменти  $M_u$ , поздовжні  $N$  і поперечні  $Q$  сили.

Запропонована модернізована скінченноелементна рамна модель розрахунку фундаментів складається з окремих скінченних стрижневих елементів  $CE$  різної висоти для наближення до дійсної плоскої арочної системи.

Для моделювання поперечного перерізу фундаменту коксової батареї №10 біс ВАТ «Алчевськкокс» завтовшки 1000 мм рамною стрижневою схемою поданий ригель складається з окремих стрижневих

елементів різної висоти. Чисельне моделювання проведено за допомогою ПК ЛІРА. Арочні частини в світлі між колонами 1940 мм складені з п'яти елементів однакової довжини – 388 мм і різної висоти: 840,600,500,600,840 мм, рівновеликих площам заміненних арок. Частини ригеля над колонами визначені висотою  $500 + 970 = 1470$  мм і шириною колон: для крайніх ( $CE42, CE47$ ) рівною 1360 мм, для ( $CE43, CE46$ ) рівною 1600 мм і для середніх ( $CE44, CE45$ ) - 1260 мм.

Вісь ригеля прийнята на відстані 250 мм від верху фундаменту, осі колон – по середині їх ширини, висота колон до центральної осі ригеля – 2450 мм. За цими даними і характеристиками бетону ( $E_c = 25000$  МПа,  $R_0 = 0.025$  МН/м<sup>3</sup>) розраховані жорсткості елементів рами (рис. 4).

### Список типів жорсткості

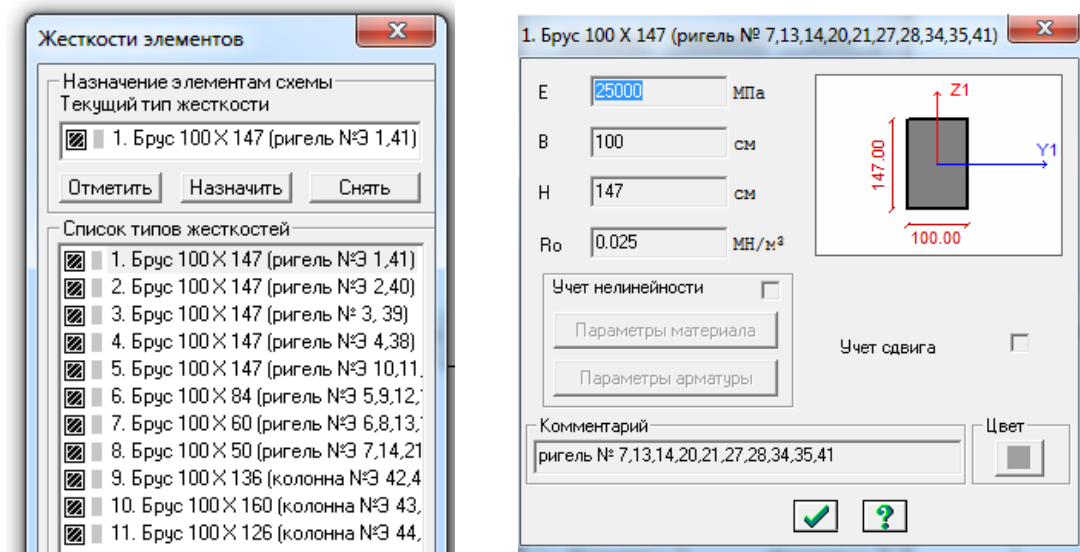


Рис. 4. Список типів жорсткості елементів рами

На рис. 5 показана розрахункова схема рами з номерами вузлів з'єднання  $CE$ , на рис. 6 – з номерами  $CE$ .

При складанні елементів врахована особливість з'єднання стрижневих і плоских скінченних елементів [17].

Особливість полягає в тому, що якщо по вузлах плити встановити ригелі, то отримаємо варіант збігу серединної поверхні плити і центру тяжіння стрижня ригеля. Цей нескоригований варіант демонструється на рис. 7.

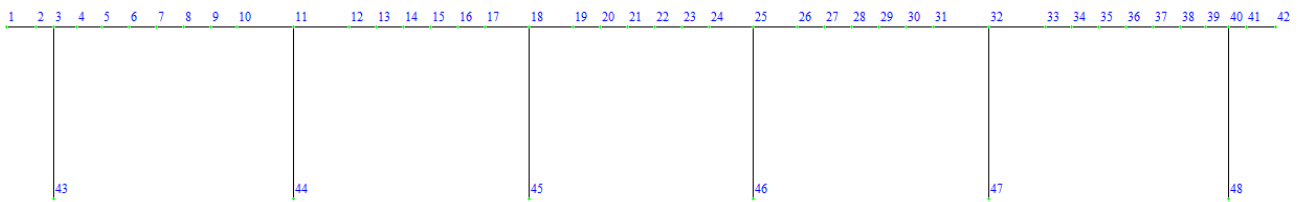


Рис. 5. Номери вузлів з'єднання скінченних елементів

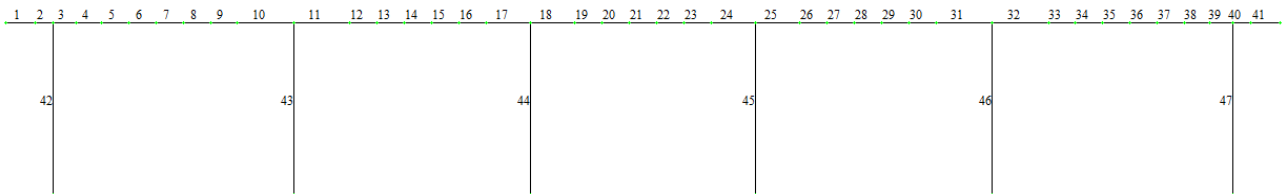


Рис. 6. Номери скінченних елементів

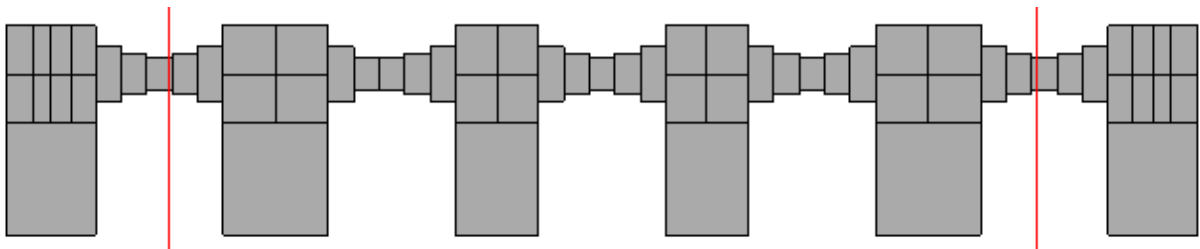


Рис. 7. Нескоригована просторова модель (3D-графіка)

Для усунення цієї помилки можна скористатися, наприклад, введенням абсолютно жорстких вставок. Скоригована

розрахункова схема подана на рис. 8, на рис. 9 дається її перспектива.

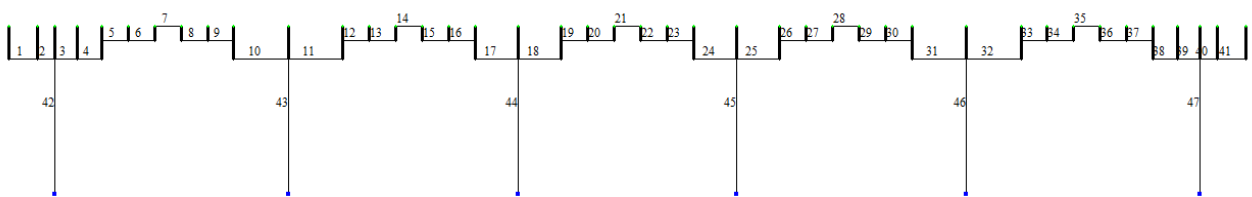


Рис. 8. Скоригована SE-модель жорсткими вставками

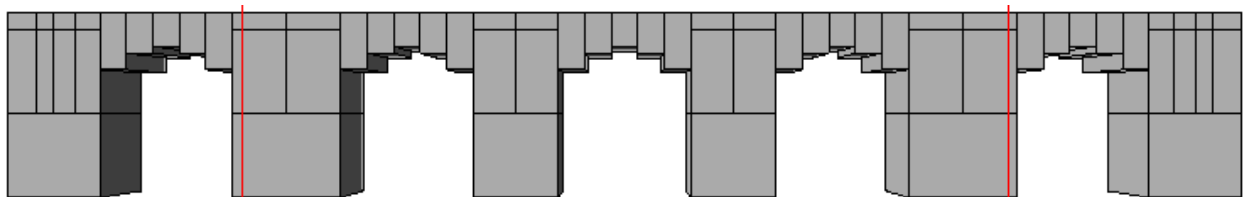


Рис. 9. Скоригована модель (перспектива-картографічне зображення)

**Задання зв'язків.** У всіх нижніх вузлах колон накладена заборона на переміщення по осі Z (вузли 43 - 48), а в нижньому третьому зліва вузлі колони 44 – додаткова заборона по осі X і поворотів UX і UZ.

**Навантаження:**

1 навантаження – власна вага фундаменту, яка підраховується для кожного елемента і задається у вигляді рівномірно розподілених сил уздовж глобальної осі Z;

2 навантаження – зосереджені сили P1 = 1,65 т у вузлах № 2,41; P2 = 6 т у вузлах №4,39 і розрахункове навантаження від ваги кладки і обладнання у вигляді рівномірно розподілених сил уздовж глобальної осі Z для ригеля q = 19,7 Тс / м;

3 навантаження – температурне, яке задається температурним перепадом

уздовж місцевої осі Z1. Для ригеля у першому, другому, четвертому і п'ятому прольотах T1 = 350 °С, T2 = 400 °С, для третього прольоту T1 = 350 °С, T2 = 300 °С. Для колон: №42 – T1 = 400 °С, T2 = 20 °С; №43 – T1 = 400 °С, T2 = 400 °С; №44 – T1 = 300°С, T2 = 400°С; №45 – T1 = 400 °С, T2 = 300 °С; №46 -T1 = 400 °С, T2 = 400 °С; №47 -T1 = 20 °С, T2 = 400 °С.

Коефіцієнт температурного розширення для бетону прийнятий  $\alpha=10 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

**Результати розрахунку.** На рис. 10-18 подано епюри поздовжніх сил N, поперечних сил Q і згинальних моментів M при навантаженні власною вагою (1-ше навантаження), навантаженні зосередженими силами і вагою кладки батареї (2-ге навантаження) і температурними впливами (3-тє навантаження).

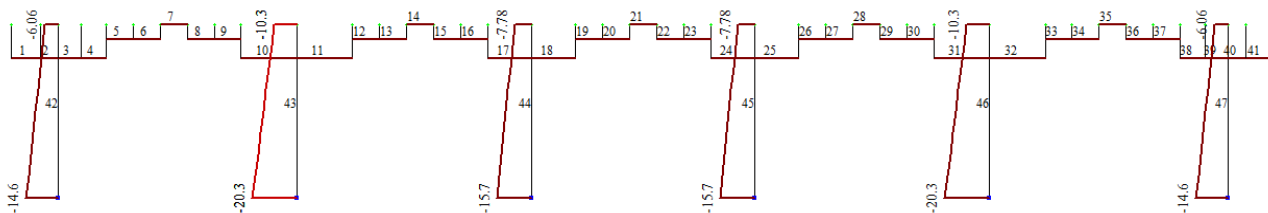


Рис. 10. Епюри поздовжніх сил N, т, при навантаженні власною вагою (мінімальне зусилля -20,3167 т)

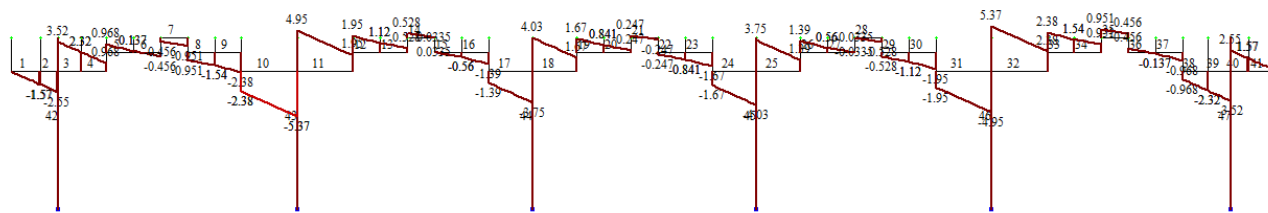


Рис. 11. Епюри поперечних сил Q, т, при навантаженні власною вагою (мінімальне зусилля -5,37304 т, максимальне зусилля 5,37304 т)

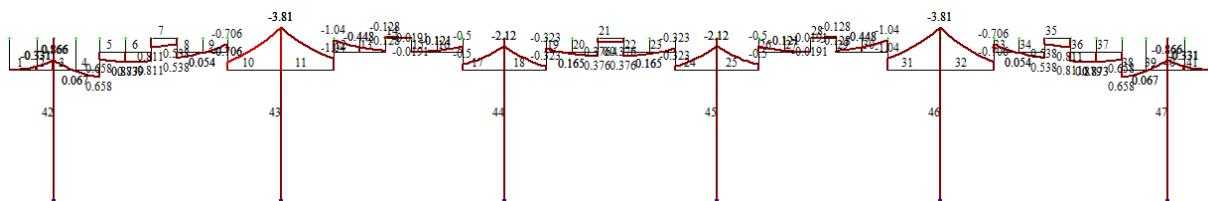


Рис. 12. Епюри згинальних моментів M, тм, при навантаженні власною вагою (мінімальне зусилля -3,80561 тм, максимальне зусилля 0,878929 тм)

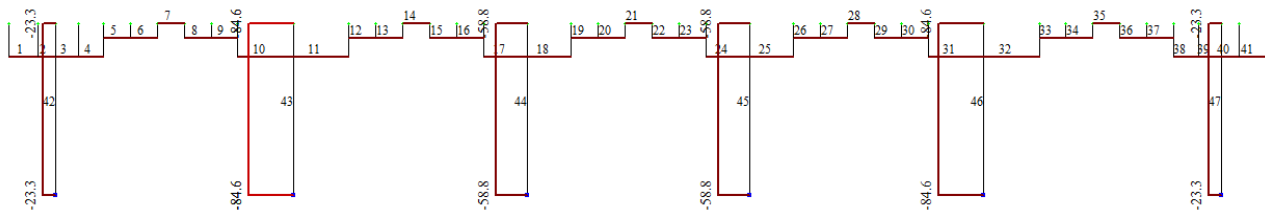


Рис. 13. Епюри поздовжніх сил  $N$ , т, при навантаженні зосередженими силами і вагою кладки батареї (мінімальне зусилля -84,5655 т)

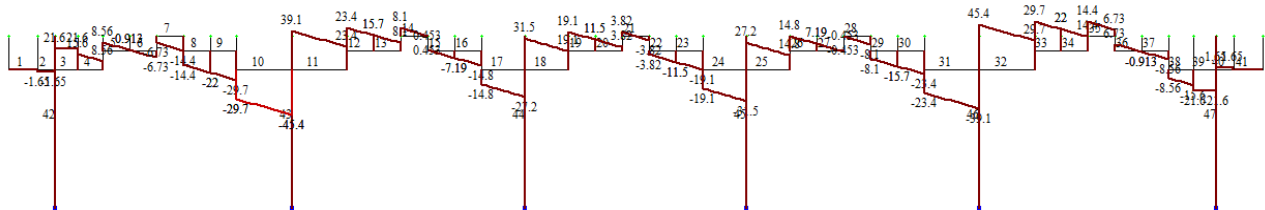


Рис. 14. Епюри поперечних сил  $Q$ , т, при навантаженні зосередженими силами і вагою кладки батареї (мінімальне зусилля -45,4215 т, максимальне зусилля 45,4215 т)

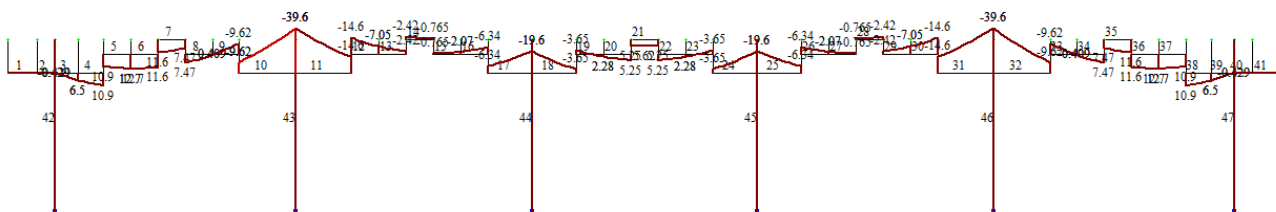


Рис. 15. Епюри згинальних моментів  $M$ , тм, при навантаженні зосередженими силами і вагою кладки батареї (мінімальне зусилля -39,6496 тм, максимальне зусилля 12,7136 тм)

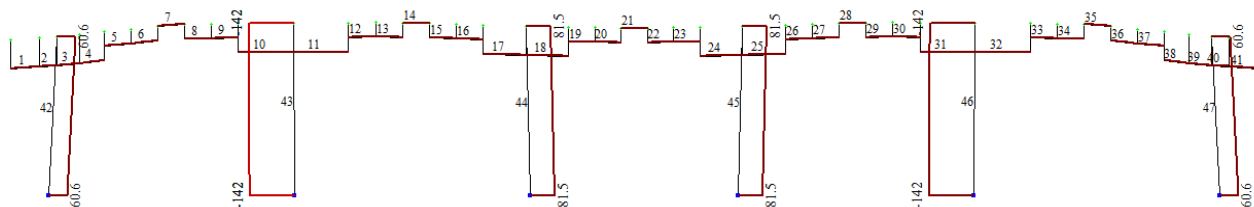


Рис. 16. Епюри поздовжніх сил  $N$ , т, при температурному впливі (мінімальне зусилля -142,068 т, максимальне зусилля 81,5139 т)

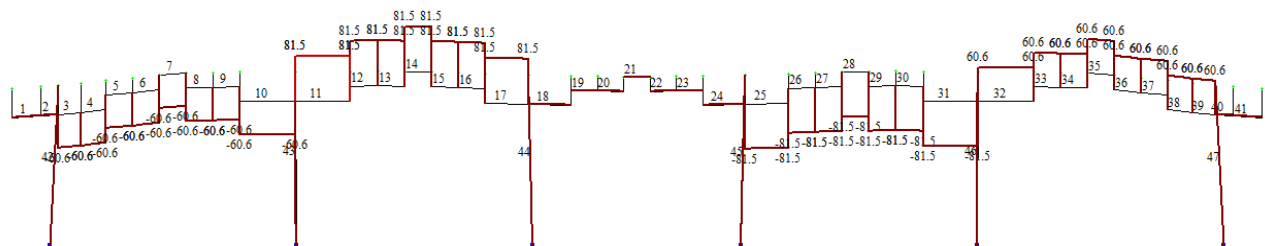


Рис. 17. Епюри поперечних сил  $Q$ , т, при температурному впливі (мінімальне зусилля -81,5139 т, максимальне зусилля 81,5139 т)

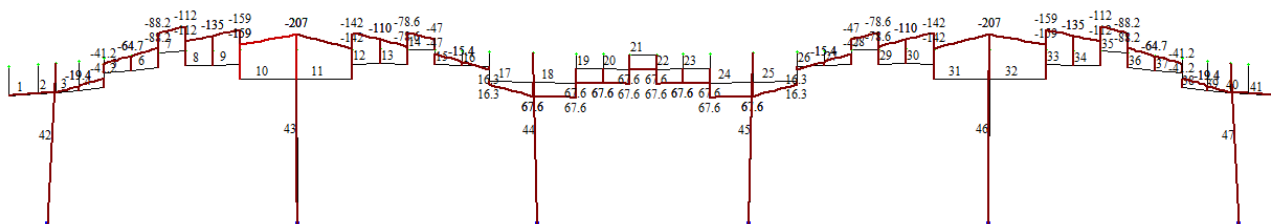


Рис. 18. Епюри згинальних моментів  $M$ , тм, при температурному впливі (мінімальне зусилля  $-207,095$  тм, максимальне зусилля  $67,6068$  тм)

### Підбір арматури

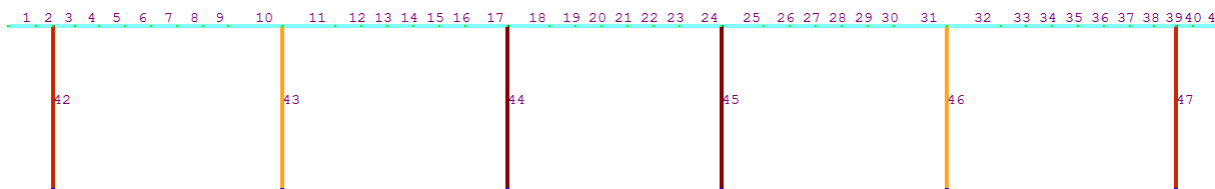
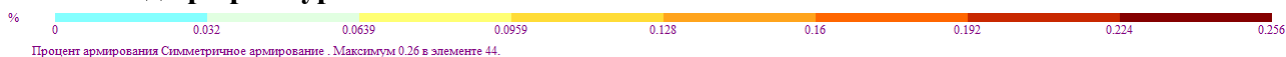


Рис. 19. Відсоток армування в колонах (максимум  $0,26$  % в колоні 44)

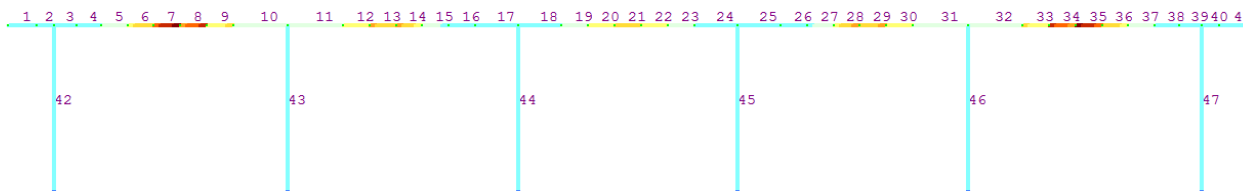
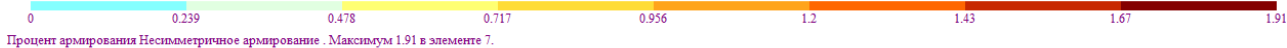


Рис. 20. Відсоток армування в елементах ригеля (максимум  $1,91$  % в елементі 7)

Арматуру в балці 7 і в колоні 44 див. в таблиці.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку:**

1. Запропонована модернізована скінченноелементна рамна модель розрахунку фундаментів коксових батарей з боковим підведенням опалювального газу, що складається з окремих скінченних стрижневих елементів СЕ різної висоти,

показала свою ефективність у порівнянні з традиційною рамною системою.

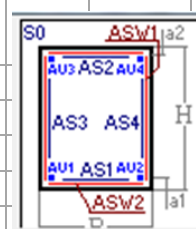
Нова розрахункова модель збільшила надійність конструкції фундаменту за рахунок наближення до дійсної плоскої аркої системи, не суттєво ускладнивши трудомісткість розрахунку.

2. Подальший розвиток запропонованого підходу може мати місце при розрахунках різних конструкцій, елементи яких мають різні розміри та конфігурації за їх довжиною.



Таблиця

Пере-різ	Симет-рія	Поздовжня арматура, см <sup>2</sup>									Поперечна, см <sup>2</sup>		Ширина тріщин, мм	
		AU1	AU2	AU3	AU4	AS1	AS2	AS3	AS4	%	ASW1	ASW2	скорочено	тривало
Балка 7; Прямокутник; В=100.00; Н=50.00 см; L=0.39 м														
Бетон В20; Арматура: поздовжня А-III; поперечна А-I														
1	Н	4.5	4.5	12.57	12.57		37			1.42	14.6		0.28	0.28
		3.5	3.5	12.57	12.57		37			1.38				
2	Н	3.75	3.75	12.57	12.57		50.5			1.66	14.6		0.29	0.29
		3	3	12.57	12.57		50.5			1.63				
3	Н	6.25	6.25	12.57	12.57		58			1.91	14.6		0.14	0.14
		6.25	6.25	12.57	12.57		58			1.91				
Колона 44; Прямокутник; В=100.00; Н=126.00 см; L=2.45, LY=1.72, LZ=1.72 м														
Бетон В20; Арматура: поздовжня А-III; поперечна А-I														
1	С	5.79	5.79	5.79	5.79	2.26	2.26	2.26	2.26	0.26			0.29	0.29
		3.27	3.27	3.27	3.27	2.26	2.26	2.26	2.26	0.18				
2	С	5.79	5.79	5.79	5.79	2.26	2.26	2.26	2.26	0.26			0.29	0.29
		3.27	3.27	3.27	3.27	2.26	2.26	2.26	2.26	0.18				
3	С	5.79	5.79	5.79	5.79	2.26	2.26	2.26	2.26	0.26			0.29	0.29
		3.27	3.27	3.27	3.27	2.26	2.26	2.26	2.26	0.18				



**Список використаних джерел**

1. Кауфман, А. А. Отечественные и зарубежные коксовые печи: конструкции и оборудование [Текст]: учеб. пособие / А. А. Кауфман, Ю. Я. Филоненко; Министерство образования и науки Российской Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 88 с.
2. Кауфман, А. А. Технология коксохимического производства: учеб. пособие для вузов [Текст] / А. А. Кауфман, Г. Д. Харлампович. – Екатеринбург: ВУХИН-НКА, 2005. – 288 с.
3. 98/03564 Technical trends in the redesign and construction of coke oven batteries and units for dry quenching of coke. Fuel and Energy Abstracts. – September 1998. – Volume 39, Issue 5. – Page 336.
4. Input-output nonlinear model of a coke oven battery. Control Applications of Nonlinear Programming and Optimization / C. Bénard, S. Berekdar, C. Duhamel, M.-M. Rosset. – 1989, 1990. – Pages 95-99.
5. CFD analysis of the thermal behaviour of heating walls in a coke oven battery. International Journal of Thermal Sciences / Jacek Smolka, Lukasz Slupik, Adam Fic, Andrzej J. Nowak, Ludwik Kosyrzyk. – June 2015. – Volume 104. – Pages 186-193.
6. Slab heat loss calculation with non-uniform inside air temperature profiles. Energy Conversion and Management / Sangho Choi, Moncef Krarti. – September 1996. – Volume 37, Issue 9. – Pages 1435-1444.
7. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. – 71 с.
8. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.

9. ДСТУ-Н-П Б В.2.6-XX:20XX. Проектування залізобетонних конструкцій. Ч. 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. (EN 1992-1-2:2004, MOD).
10. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры [Текст]. – М., 2004.
11. СНиП 2.03.04-84. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях повышенных и высоких температур [Текст]. – М., 1985.
12. СП 52-110-2009. Бетонные и железобетонные конструкции, подвергающиеся технологическим повышенным и высоким температурам [Текст] / ФГУП «НИЦ «Строительство». – М., 2009. – 166 с.
13. СП 27.13330.2011. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. Актуализированная редакция СНиП 2.03.04-84 [Текст]. – М., 2011. – 115 с.
14. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций [Текст]. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2006. – 81 с.
15. СП 52-00-2011. Бетонные и железобетонные конструкции, подвергающиеся технологическим температурным воздействиям. Актуализированная редакция СНиП 2.03.04-84 [Текст]. – М., 2011.
16. Фомин, С. Л., Температурные поля в конструкциях фундаментов коксовых батарей [Текст] / С. Л. Фомин, А. М. Кравченко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 73. – С. 436-444.
17. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона (проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии) [Текст] / А. С. Городецкий, Л. Г. Батрак, Л. В. Лазнюк и др. – К.: Изд-во «Факт», 2004. – 106 с.

---

Фомін Станіслав Леонідович, д-р техн. наук, професор кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-01-63. E-mail: Sfomin@ukr.net.

Кравченко Олександр Михайлович, здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Заступник директора ДП «ГИПРОКОКС» Тел.: (057) 719-22-96. +380675465343. E-mail: kravchenko@giprokoks.com.

Fomin Stanislav Leonidovich, Doctor of Sciences, professor of chair of concrete and masonry structures at Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (057) 700-01-63.

E-mail: Sfomin@ukr.net.

Kravchenko Alexander Michailovich, applicant for scientific degree of candidate of technical sciences at chair of concrete and masonry structures in Kharkiv National University of Construction and Architecture. Deputy Director of SE "GIPROKOKS". Tel.: (057) 719-22-96. E-mail: kravchenko@giprokoks.com.

Стаття прийнята 18.05.2016 р.

УДК 69.07

**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ОТ УСАДКИ БЕТОНА В РЕБРАХ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ**

Ассист. А. Н. Сироменко, старш. препод. Е. С. Седышев (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова)

**РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА УТВОРЕННЯ ТРІЩИН ВІД УСАДКИ БЕТОНУ У РЕБРАХ МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЕРЕКРИТТІВ**

Асист. А. М. Сироменко, старш. викл. Є. С. Седишев (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова)

**ESTIMATION OF SHRINKAGE CRACKING OF CONCRETE IN THE RIBS OF MONOLITHIC CONCRETE FLOOR SLABS**

Assist. A. Siromenko, senior lecturer E. Sedyshev

*В работе дана методика определения напряжений, вызывающих усадочные трещины в монолитных железобетонных балках перекрытий вследствие стесненных деформаций и нарушения технологии бетонных работ.*

*Так как учет только нормальных напряжений, в рассматриваемой задаче, не дает действительной картины трещинообразования и завышает трещиностойкость железобетонного элемента на усадочные напряжения и деформации, в методику включен также учет напряжений сдвига по контакту плиты и ребра.*

**Ключевые слова:** монолитные железобетонные перекрытия, стесненная усадка, трещинообразование.

*В роботі дана методика визначення напружень, що викликають усадочні тріщини в монолітних залізобетонних балках перекриттів унаслідок обмежених деформацій і порушення технології бетонних робіт.*

*Так як врахування тільки нормальних напружень, в розглянутій задачі, не дає дійсної картини утворення тріщин і завищує тріщиностійкість залізобетонного елементу на усадочні напруження і деформації, в методиці враховуються також напруження зсуву по контакту плити і ребра.*

**Ключові слова:** монолітні залізобетонні перекриття, обмежена усадка, утворення тріщин.

*This paper describes methods of determination of stresses which cause shrinkage cracks in the monolithic reinforced concrete beams of slabs. These cracks appear because restrained conditions restrain the free deformation and violation of concreting technology. Increasing the ratio of reinforcement leads to increased tensile stresses during concrete shrinkage. If stresses reach the strength of the concrete tensile appear shrinkage cracks.*

*The calculations show that taking into account only the normal stresses in the problem, does not give a true picture of cracking and fracture of reinforced concrete element inflates to shrinkage stress and strain, so the method of calculation enabled the shear stress on the contact plate and the ribs.*

**Keywords:** monolithic reinforced concrete floor slab, restrained shrinkage, cracking.

**Введение.** Усадка железобетона доставляет строителям немало беспокойств. В зависимости от условий эксплуатации строительных зданий и сооружений нормами [1] допускается использование железобетонных конструкций с усадочными трещинами при обеспечении условий, при которых эти деструкции не влияют на надлежащую работу конструкций. Таким образом, исследователи сталкиваются с задачей по оценке величины раскрытия трещин и определения их влияния на работу конструкций.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Строительные бетоны при твердении могут сокращаться в объеме или укорачиваться по трем измерениям (подвергаются усадке). Усадка бетона зависит от ряда причин: количества и вида цемента (больше при большем расходе цемента, высокоактивные и глиноземистые цементы дают большую усадку); количества воды на затворение цемента (больше при большем В/Ц); крупности заполнителя (на мелкозернистом песке усадка больше); применения гидравлических добавок и ускорителей твердения; влажности окружающей среды [2-9].

Так, при обследовании недостроенного остова бескаркасного монолитного жилого дома [10] в поперечных стенах-диафрагмах были обнаружены вертикальные трещины, которые, как выяснилось, были усадочными. Появились они в результате стесненной усадки, по причине нарушений организации бетонных работ (бетонирования, ухода за распалубленными конструкциями).

Японские исследователи в своей работе [11] показали появление внутренних напряжений в стенах, превышающих предел трещинообразования, из-за стесненной усадки. Согласно расчетной модели, ограничителями свободных деформаций усадки стеновых элементов являлись балки, между которыми они находились.

**Определение цели и задачи исследования.** В строительной практике появление усадочных трещин – это нередкое явление, перед проектировщиками стоит задача определить значение растягивающего напряжения, в условиях стесненной усадки, выявить границы трещинообразования. Авторы исследования поставили перед собой задачу определения возможности трещинообразования в ребрах монолитных железобетонных перекрытий с учетом напряжений сдвига по контакту плиты и ребра. Учет только нормальных напряжений в рассматриваемой задаче не даст достаточно надежной оценки трещинообразования и завьсит трещиностойкость железобетонного элемента на усадочные напряжения и деформации.

**Основная часть исследования.** В железобетонных конструкциях стальная арматура из-за сцепления с бетоном становится внутренней связью и препятствует свободной усадке бетона. В бетоне и арматуре возникают собственные уравновешенные напряжения (растяжение в бетоне и сжатие в арматуре). Средние деформации растяжения в бетоне ( $\varepsilon_{sht}$ ) можно вычислить по разности свободных линейных деформаций усадки бетона ( $\varepsilon_{shc}$ ) и стесненной усадки армированного элемента ( $\varepsilon_{shs}$ ) [13]

$$\varepsilon_{sht} = \varepsilon_{shc} - \varepsilon_{shs} \quad (1)$$

Средние растягивающие напряжения в бетоне, подсчитанные через тангенциальный модуль деформаций,

$$\sigma_{sht} = \varepsilon_{sht} \cdot E_c \cdot \nu_{ct}, \quad (2)$$

где  $\nu_{ct}$  - коэффициент упругопластических деформаций бетона при растяжении. Если растягивающее напряжение в бетоне приближается к пределу прочности, то среднее опытное значение  $\nu_{ct} = 0,5$  [13].

Наибольшие значения растягивающих напряжений находятся в зоне контакта с арматурой. Деформации  $\varepsilon_{shs}$  для арматуры упругие и в ней возникают сжимающие напряжения

$$\sigma_s = \varepsilon_{shs} \cdot E_s. \quad (3)$$

Уравнение равновесия внутренних усилий в элементе при двусторонней симметричной арматуре

$$\sigma_{shl} \cdot A_c = \sigma_s \cdot A_s \text{ или } \sigma_{shl} = \sigma_s \cdot \rho_s, \quad (4)$$

где  $\rho_s = A_s / A_c$  - коэффициент армирования продольной арматурой.

После подстановки в уравнение (4) значений напряжений и деформаций из (1, 2 и 3) можно найти значение средних растягивающих напряжений в бетоне

$$\sigma_{shl} = \frac{\varepsilon_{shc} \cdot E_s}{1/\rho_s + \alpha_s/v_{ct}}, \quad (5)$$

где  $\alpha_s = E_s / E_{ck}$ .

Свободную линейную деформацию  $\varepsilon_{shc}$  усадки бетона можно определить опытным путем или рассчитать по методике п. 3.1.3.8 ДСТУ [12] с учетом деформации усадки при высыхании  $\varepsilon_{cd}$  и деформации внутренней усадки  $\varepsilon_{ca}$ , которая развивается в процессе твердения бетона

$$\varepsilon_{shc} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}. \quad (6)$$

При этом следует отметить, что значение условного размера поперечного сечения  $h_0$  в формулу (3.8) п. 3.1.3.8 [12] следует подставлять в сантиметрах, а не в миллиметрах. Тогда величина линейной деформации усадки будет соответствовать опытным данным [15].

При усадке железобетона с увеличением коэффициента армирования возрастают растягивающие напряжения и при достижении ими прочности на растяжение бетона  $f_{ctk}$  возникают усадочные трещины. Положение п. 2.2.2.6 ДБН [1] о критерии образования трещин по достижении деформации крайнего растянутого волокна бетона в сечении предельного значения  $\varepsilon_{ctu} = \frac{2 \cdot f_{ctm}}{E_{ck}}$ , на

наш взгляд, значительно завышает трещиностойкость при усадочных деформациях в бетоне и для таких задач неприменимо. Вопрос о критерии образования усадочных трещин в железобетонных элементах требует дополнительных исследований.

В этой работе рассмотрим систему, состоящую из железобетонных плиты и ребра, при действии напряжений от усадки железобетона и напряжений при изгибе балки таврового сечения от собственного веса конструкции. Длина расчетного блока конструкции принимается равной шагу усадочных трещин  $S_r$ , который можно определить по п. 5.3.4.3 ДСТУ [12] или опытным путем (рис. 1).

Напряжения растяжения в полке сечения при стесненной усадке элемента можно определить по формуле (5), как для симметрично армированного железобетонного элемента. Напряжения растяжения на уровне центра тяжести арматуры ребра можно определить по формуле (1.28) [13], как для одностороннего несимметричного армирования

$$\sigma_{shl} = \frac{2,25 \cdot \varepsilon_{shc} \cdot E_s}{1/\rho_s + 2,25\alpha_s/v_{ct}}. \quad (7)$$

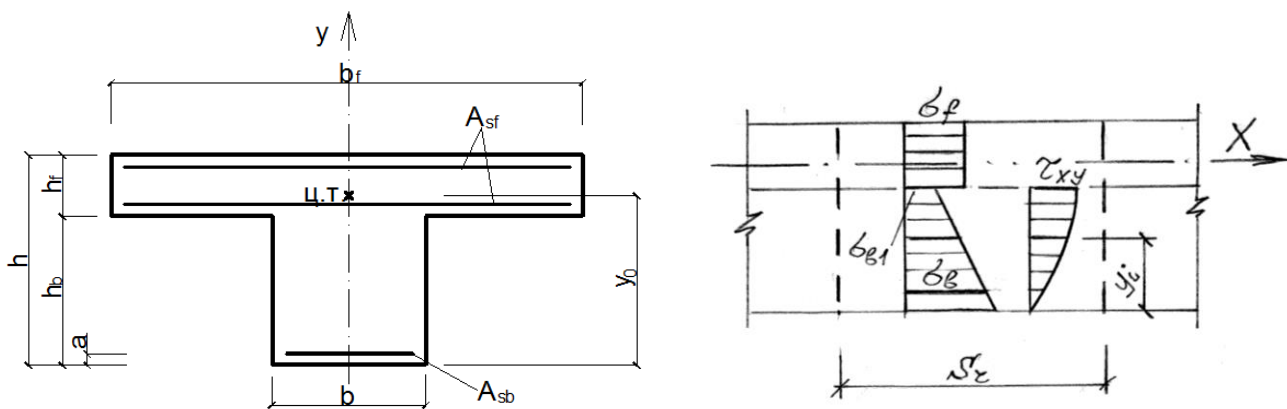


Рис. 1. Схема к определению в железобетонном элементе таврового сечения усадочных напряжений

Касательные напряжения на контакте ребра и полки определим, как и в работе [16], из условия равновесия стержня в пределах полки на длине расчетного блока

$$\sigma_f \cdot A_f = \tau_{xy} \cdot b \cdot S_r,$$

отсюда

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_f \cdot b_f \cdot h_f}{b \cdot S_r}, \quad (8)$$

где  $\sigma_f = \sigma_{shf}$  по формуле (5) – средние растягивающие напряжения в полке от усадки бетона.

Нормальные напряжения в ребре на контакте с полкой определим из условия равновесия стержня в пределах ребра на длине расчетного блока

$$\frac{\sigma_b + \sigma_{b1}}{2} \cdot b \cdot (h_b - a) = \tau_{xy} \cdot b \cdot S_r,$$

отсюда

$$\sigma_{b1} = \frac{2 \cdot S_r \cdot \tau_{xy}}{h_b - a} - \sigma_b, \quad (9)$$

где  $\sigma_b = \sigma_{shb}$  по формуле (7) – растягивающие напряжения на уровне рабочей арматуры в ребре от усадки бетона.

По высоте сечения ребра допускаем линейное распределение нормальных напряжений и параболическое для касательных напряжений

$$\sigma_{bi} = \sigma_b \left[ 1 - \frac{(y_i - a)(\sigma_b - \sigma_{b1})}{\sigma_b (h_b - a)} \right], \quad (10)$$

$$\tau_{xyi} = \tau_{xy} \sqrt{y_i / h_b}, \quad (11)$$

где  $y_i$  – координата по высоте от нижней грани ребра.

Суммарные нормальные напряжения по высоте ребра

$$\sigma_{xi} = \sigma_{bi} + \sigma_{ci}, \quad (12)$$

где нормальные напряжения по высоте ребра

$$\sigma_{ci} = \frac{M_g \cdot (y_0 - y_i)}{I_x}, \quad (13)$$

где  $M_g$  – изгибающий момент в расчетном сечении при действии нагрузок от собственного веса перекрытия;

$I_x$  – момент инерции расчетного таврового сечения элемента;

$y_0$  – координата центра тяжести таврового сечения от нижней грани ребра.

Условие прочности ребра при сложных деформациях для бетона, как хрупкого материала, примем по теории прочности Мора (формула 5.61 [17])

$$0,5 \cdot \sigma_{xi} (1 - \chi) + 0,5 \cdot (1 + \chi) \sqrt{\sigma_{xi}^2 + 4\tau_{xyi}^2} \leq f_{ctk} \quad (14)$$

где  $\chi = f_{ctk} / f_{ck}$  – соотношение прочностей на растяжение и на сжатие для расчетного класса бетона.

Если условие (14) соблюдается, то усадочные трещины не образуются.

В качестве примера по разработанной методике рассчитаны балки на трещинообразование от усадочных деформаций. Исследования проводились в недостроенном монолитном каркасном здании с сеткой колонн 6х6 м по ул. О. Яроша в г. Харькове. При техническом обследовании в балках подкрепления контура (рис. 2) монолитных

железобетонных плит перекрытия с консольными участками вылетом 2,3 м выявлены усадочные трещины.

Эти трещины нормальные к продольной оси балок, расположены в их пролете и ветвятся на всю высоту ребра. В большинстве случаев количество усадочных трещин варьируется от 1 до 4 шт. (рис. 3), но также встречаются конструкции с количеством трещин 5...9 шт. Шаг трещин в основном соответствует проектному шагу хомутов 200...250 мм. Проектный класс бетона для монолитного перекрытия С20/25.

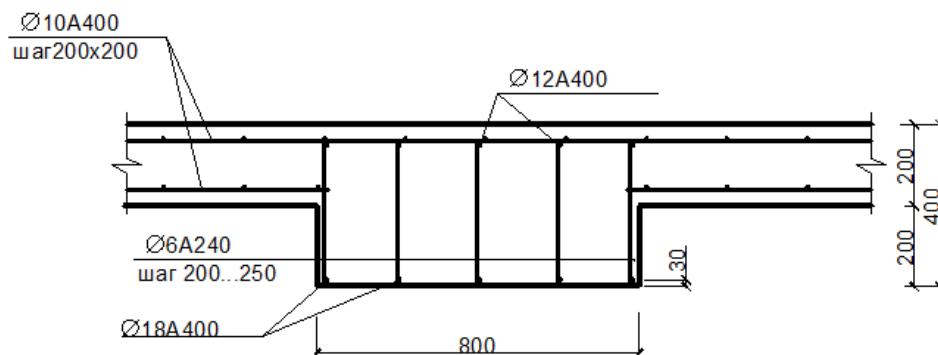


Рис. 2. Сечение балки монолитного перекрытия и ее армирование

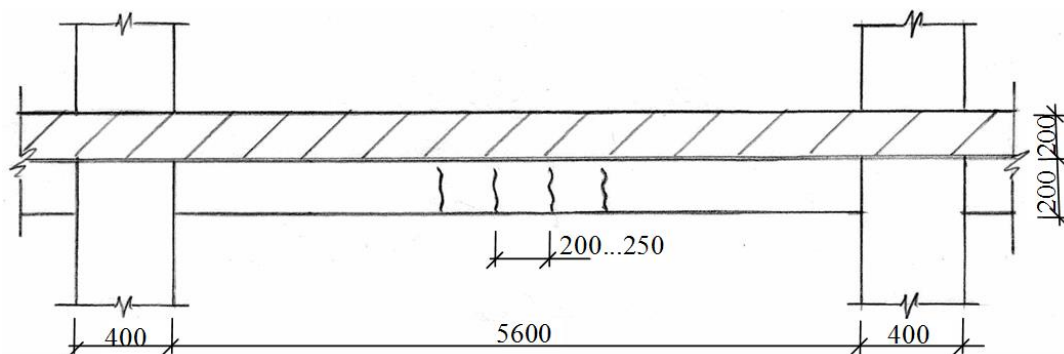


Рис. 3. Схема расположения усадочных трещин в балке монолитного перекрытия

Поверочные расчеты балки с указанными параметрами и нагрузкой от собственного веса перекрытия показали, что главные растягивающие напряжения, подсчитанные по формуле (14) для свободных деформаций усадки бетона в возрасте 28 суток и после распалубки на 7-е сутки (подсчитаны по 3.1.3.8 ДСТУ [12]), приблизительно одинаковы по всей высоте ребра и составляют 1,3 МПа, что несколько меньше характеристического значения прочности бетона класса С20/25 в 1,5 МПа. При этом, если выполнить расчет усадочных деформаций для возраста бетона от трех месяцев, то они уже увеличиваются на 15 % и более, а растягивающие напряжения достигнут и превысят предел прочности. Возраст бетона перекрытий, рассмотренных в примере, на момент обследования составлял уже более семи лет. В методике ДСТУ [12] при расчете свободных деформаций усадки бетона не учитываются различия в количестве воды затворения или водо-цементного отношения. Если учитывать повышенный расход воды при бетонировании, например по формулам 2.31 и 2.33 [14], то при увеличении объема воды на 1 м<sup>3</sup> бетона со

150 до 200 л деформации свободной усадки бетона могут увеличиться в 1,5 раза. Обследование по верху плит перекрытий недостроенного здания показало, что на многих участках перекрытий действительно укладывался бетон с повышенным расходом воды. Если бетон изготавливался на шлаковом портландцементе, то усадочные деформации также могут возрастать на 25 % [14].

#### **Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении**

1. Стесненные деформации усадки железобетонных элементов могут привести к раскрытию трещин еще до рабочего нагружения элементов, что нужно учитывать на стадии проектирования и подбора технологии возведения конструкций.

2. Результаты расчетов трещинообразования от усадки бетона в ребрах монолитных плит по предложенной методике согласуются с опытными данными.

3. В дальнейшем требуется дополнительно исследовать вопрос о критерии образования усадочных трещин в железобетонных элементах.

#### **Список использованных источников**

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст]: ДБН В.2.6.-98:2009 // Мінрегіонбуд України. – К., 2009.
2. Александровский, С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести [Текст] / С. В. Александровский. – М.: Стойиздат, 1973.
3. Фрайфельд, С. Е. Собственные напряжения в железобетоне [Текст] / С. Е. Фрайфельд. – М. Л.: Стройиздат, 1941. – 128 с.
4. Карпенко, Н. И. Теория деформирования железобетона с трещинами [Текст] / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1976. – 208 с.
5. Улицкий, И. И. Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов [Текст] / И. И. Улицкий. – К.: Будівельник, 1967. – 347 с.
6. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила для зданий (EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings).



7. Bažant, Z. P., 2000, "Criteria for Rational Prediction of Creep and Shrinkage of Concrete," The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effects, SP-194, A. Al-Manaseer, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 237-260.
8. Bažant, Z. P. (2001). "Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future." Nuclear Engrg. Des., 203, 27-38.
9. ACI Committee 209. (2008). Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete (ACI 209.2R-08). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
10. Сироменко, А. Н. Экспериментальные исследования НДС плитных железобетонных элементов при температурно-усадочных воздействиях [Текст] / А. Н. Сироменко, А.Ю. Кулаков // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. Сер. Технические науки и архитектура. – К.: Техника, 2004. – Вып.60. – С. 65-75.
11. Kanda, T., Momose, H., Imamoto, K., Mihashi, H.: Stochastic approach to shrinkage cracking control for reinforced concrete structural elements. In: Journal of Advanced Concrete Technology 6 (2008) 1, pp.121-133.
12. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст]: ДСТУ Б В.2.6-156:2010 // Мінрегіонбуд України. – К., 2011.
13. Байков, В. Н. Железобетонные конструкции: Общий курс [Текст] / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1985. – 728 с.
14. Проектирование железобетонных конструкций [Текст]: справоч. пособие / под ред. А. Б. Голышева. – К.: Будівельник, 1985. – 496 с.
15. Ерышев, В. А. Усадочные деформации в бетонных и железобетонных элементах [Текст] / В. А. Ерышев, Е. В. Латышева, А. С. Бондаренко // Известия КГСАУ. – 2012. – № 4. – С. 97-101.
16. Молодченко, Г. А. Трещинообразование в монолитных железобетонных плитах от усадки бетона [Текст] / Г. А. Молодченко, А. Н. Сироменко, А. Ю. Кулаков // Строительство материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Днепропетровск: ПГАСА, 2009. – Вып. 50. – С. 380-385.
17. Барданов, Ю. М. Курс сопротивления материалов в структурно-логических схемах [Текст] / Ю. М. Барданов. – К.: Вища шк., 1988. – 215 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. С. Шмуклер

---

Сироменко Анна Миколаївна, асистент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. 7073107. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Седишев Євгеній Серафимович, старший викладач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М.Бекетова. Тел. 7073107. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Siromenko Anna, assistant, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.  
Sedyshev Evgen, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

Стаття прийнята 19.05.2016 р.

УДК 621.314.25

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

Канд. техн. наук Е. В. Ягуп

**МОДЕЛЮВАННЯ НЕСИММЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИМЕТРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ**

Канд. техн. наук К. В. Ягуп

**SIMULATION OF ASYMMETRICALLY POWER SUPPLY SYSTEMS WITH USING OPTIMIZATION FOR DETERMINING PARAMETERS OF BALANCING DEVICE**

Cand. of techn. sciences K. Yagup

*Рассматривается возможность устранения несимметрии в сети электроснабжения с использованием симметрирующего устройства, представляющего собой комплект конденсаторных батарей, соединенных в треугольник. Для определения параметров симметрирующего устройства применяется поисковая оптимизация. Реализация метода осуществлена на визуальной модели средствами программы MATLAB и ее приложений Simulink и SimPowerSystems. В результате выполнения поисковой оптимизации режим работы сети стал симметричным, амплитуды сетевых токов снизились в несколько раз, а реактивная мощность сети сведена практически до нуля.*

**Ключевые слова:** трехфазная система, несимметрия, поисковая оптимизация, симметрирующее устройство.

*Розглядається можливість усунення несиметрії в мережі електропостачання з використанням симетруючого пристрою, що являє собою комплект конденсаторних батарей, з'єднаних в трикутник. Для визначення параметрів симетруючого пристрою застосовується пошукова оптимізація. Реалізація методу здійснена на візуальній моделі засобами програми MATLAB і її додатків Simulink і SimPowerSystems. В результаті виконання пошукової оптимізації режим роботи мережі став симетричним, амплітуди мережних струмів знизилися в кілька разів, а реактивна потужність мережі була зведена практично до нуля.*

**Ключові слова:** трифазна система, несиметрія, пошукова оптимізація, симетруючий пристрій.

*The asymmetry of the network reduces technical and economic indexes of supply network itself and its customers. It is advisable for asymmetry elimination, to use a special balancing equipment, which consists of capacitor battery set connected in a triangle.*

*The possibility of determining the values of parameters of balancing equipment using search optimization is considered. Implementation of the method performed on a visual model of the software MATLAB and its applications Simulink and SimPowerSystems. To perform search optimization the built-in MATLAB function fminsearch () was used. The efficiency function is*

*formulated as root-mean-square functional that uses effective voltage values measured at the terminals of the load, and the optimization parameters are the values of balancing capacitors.*

*As a result of search optimization symmetrical operation of three-phase power supply system has been determined. By rotation of balancing system full compensation of reactive power in the system was achieved. Amplitude values of network currents became several times smaller. The possibility of switching to a two-element balancing system was shown.*

**Keywords:** *three-phase system, asymmetry, search optimization, balance device.*

**Актуальность.** Несимметрия сети снижает технико-экономические показатели работы, как самой сети электроснабжения, так и ее потребителей [1-3]. При несимметричных режимах возникают токи и напряжения нулевой и обратной последовательностей, создающие магнитные поля, вращающиеся встречно вращению ротора электродвигателя [4-7]. При этом срок службы асинхронного двигателя может сократиться вдвое при его питании от несимметричной системы электроснабжения. Поэтому задача устранения несимметрии является актуальной.

Одним из важнейших параметров качества электрической энергии является коэффициент несимметрии напряжения, нормально допустимая величина которого равна 2 %, а предельно допустимая 4 % [1-3]. Одной из причин возникновения несимметрии в сетях электроснабжения является питание электропоезда от двух фаз на железных дорогах [8].

Применение схем, состоящих из трех батарей конденсаторов с различными емкостями, включенными в треугольник, является экономически целесообразным и надежным средством [1-3, 9]. Кроме того, использование такого устройства дает возможность не только симметризовать токи, но и компенсировать реактивную мощность в сети. При таком способе симметрирования токов необходимо определить величины емкостей конденсаторов для оптимального режима сети электроснабжения. С этой целью в [10-13] исследовалась возможность применения метода поисковой оптимизации, реализованная на визуальной модели сети электроснабжения. Однако

мгновенные значения напряжений и токов регистрировались непосредственно на стороне источников электрической энергии. Реализация на практике такого метода является затруднительной задачей, в то время как измерение электрических величин доступно на стороне нагрузки.

**Цель и задачи исследования.** Целью статьи является оптимизация режима работы трехфазной системы электроснабжения с несимметричной нагрузкой, реализованной на визуальной модели с использованием поисковой оптимизации по критерию выравнивания напряжений на зажимах нагрузки.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Определение параметров оптимизации и формирование математического выражения для целевой функции.
2. Разработка визуальной модели трехфазной сети электроснабжения с симметрично-компенсирующим устройством, в которой измерение действующих значений напряжений осуществляется на стороне нагрузки, а не на стороне сети.
3. Применение поисковой оптимизации для определения значений параметров симметричного режима работы трехфазной сети электроснабжения.
4. Преобразование найденных после оптимизации величин параметров оптимизации для полной компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения.
5. Исследование возможности перехода от трехэлементной системы симметрирования на двухэлементную.

**Основная часть.** На рис. 1 изображена визуальная модель трехфазной

системы электроснабжения, реализованная в среде MATLAB и ее приложений Simulink и SimPowerSystems.

Блоки Ea, Eb и Ec представляют собой источники напряжений. Их амплитуды  $E_a = E_b = E_c = 100 \text{ В}$ , а частоты равны 50 Гц. Сопротивления линии электропередачи соответствуют блокам za, zb и zc и равны  $R_a = R_b = R_c = 0.1 \text{ Ом}$   $L_a = L_b = L_c = 0.001 \text{ Гн}$ . Блоки zna, znb,

znc представляют собой активно-индуктивную нагрузку, которая распределена неравномерно, что вызывает несимметрию сетевых токов. Параметры нагрузки соответствуют значениям:  $R_{na} = 1.5 \text{ Ом}$ ,  $R_{nb} = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_{nc} = 2 \text{ Ом}$ ,  $L_{na} = 0.025 \text{ Гн}$ ,  $L_{nb} = 0.01 \text{ Гн}$ ,  $L_{nc} = 0.04 \text{ Гн}$ . Время прогона модели составляет 0,02 с, что достаточно для установления режима модели.

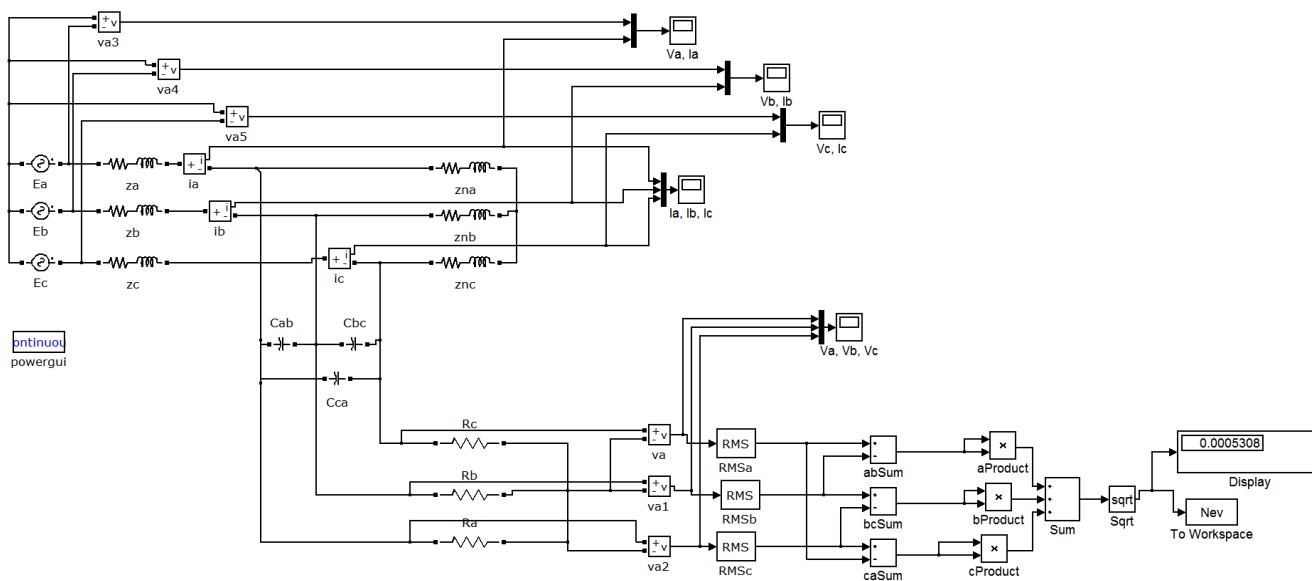


Рис. 1. Визуальная модель трехфазной трехпроводной системы электроснабжения

Симметрирующее устройство представляет собой комплект конденсаторных батарей Cab, Cbc и Cca, соединенных треугольником. Значения величин емкостей конденсаторов используются в качестве параметров оптимизации, которые в процессе поисковой оптимизации должны быть определены таким образом, чтобы режим работы сети стал оптимальным.

В качестве параметров целевой функции используются действующие

значения напряжений, измерение которых осуществляется на зажимах нагрузки. Для этого в электрическую схему системы электроснабжения включены резисторы с большими сопротивлениями, создающие искусственную нулевую точку. Эти резисторы реализованы в модели элементами Ra, Rb, Rc с сопротивлениями  $R_a = R_b = R_c = 100\,000 \text{ Ом}$ .

Целевая функция представляет среднеквадратичный функционал, реализуемый формулой

$$N = \sqrt{(V_{1a} - V_{1b})^2 + (V_{1b} - V_{1c})^2 + (V_{1c} - V_{1a})^2}$$

где  $V_{1a}, V_{1b}, V_{1c}$  – действующие значения напряжений на нагрузке, относительно искусственно созданной нулевой точки.

Реализация целевой функции осуществляется группой блоков, находящихся в нижней части модели (рис. 2). Блоки RMSa, RMSb, RMSc вычисляют действующие значения напряжений относительно нулевой точки, блоки abSum, bcSum, caSum вычитают действующие значения напряжений фаз одно из другого, согласно формуле, блоки aProduct, bProduct, cProduct возводят в квадрат полученные значения, блок Sum суммирует все значения, а затем блок Sqrt извлекает квадратный корень из полученной суммы. Блок To Workspace передает значение целевой функции в рабочее пространство MATLAB. Это значение обрабатывается специальной

программой (листинг 1), которая в конечном счете, последовательным изменением значений величин емкостей конденсаторов, минимизирует значение целевой функции.

Листинг 1 иллюстрирует текст основной программы, которая выполняет поисковую оптимизацию. Во второй строке входные параметры оптимизации представлены в качестве глобальных переменных. Эти же переменные передаются в соответствующие блоки модели Cab, Cbc, Cca. В четвертой строке осуществляется вызов специальной встроенной функции fminsearch(), выполняющей поисковую оптимизацию. В квадратных скобках указан вектор начальных значений величин емкостей конденсаторов. Имя 'func\_s3fnesim' представляет собой файл-функцию, которая доставляет значение целевой функции.

```
1 warning off
2 global Cab Cbc Cca Nst
3 Nst=0
4 Y=fminsearch('func_s3fnesim',[70.1 20.1 5.1])
5 Nst
```

Листинг 1. Текст основной программы

```
1 function Nev=func_s3fnesim(x)
2 global Cab Cbc Cca Nst
3 Cab=abs(x(1)*1E-6)
4 Cbc=abs(x(2)*1E-6)
5 Cca=abs(x(3)*1E-6)
6 sim modell
7 x
8 Nst=Nst+1
```

Листинг 2. Текст дополнительной функции

В тексте файл-функции (листинг 2) строки 3 – 5 присваивают глобальным переменным абсолютные значения, так как значения емкостей должны быть положительными величинами. Оператор sim осуществляет вызов визуальной модели

modell трехфазной системы электроснабжения, где вычисляется целевая функция, значение которой используется программой по алгоритму деформирующего многогранника.

**Анализ результатов оптимизации работы системы электроснабжения.** На рис. 2 изображены временные диаграммы сетевых токов трехфазной системы электроснабжения в несимметричном режиме до выполнения оптимизации (блоки батарей конденсаторов  $C_{ab}$ ,  $C_{bc}$ ,  $C_{ca}$  отключены).

При работе сети в таком режиме наибольшая из амплитуд токов фаз превышала наименьшую более чем в 1,5 раза и сдвиги фаз не равнялись 120 эл. градусам.

После выполнения поисковой оптимизации при начально заданных величинах емкостей конденсаторов  $C_{ab} = 10.1 \Phi$ ,  $C_{bc} = 10.1 \Phi$ ,  $C_{ca} = 10.1 \Phi$  токи стали полностью симметричными (рис. 3), и их фазы теперь одинаково сдвинуты влево относительно фаз источников (рис. 4). Значения емкостей конденсаторов в результате оптимизации стали равными  $C_{ab} = 262.52 \text{ мкФ}$ ,  $C_{bc} = 222.02 \text{ мкФ}$ ,  $C_{ca} = 92.367 \text{ мкФ}$ . Из рис. 3 и 4 видно, что в фазах наблюдается емкостной характер сдвига фаз, т. е. произошла

перекомпенсация, из-за чего в сети сохраняется реактивная мощность. Амплитудные значения сетевых токов стали равными 5.28 А.

Полная компенсация реактивной мощности может быть достигнута изменением значений емкостей конденсаторов на одну и ту же величину, что эквивалентно повороту симметрирующей системы векторов. Последовательно вычитаем из значений величин найденных емкостей корректирующее значение 1 мкФ до тех пор, пока сдвиги фаз токов не станут равными нулю относительно питающих напряжений. В результате найдены величины емкостей конденсаторов  $C_{ab} = 216.52 \text{ мкФ}$ ,  $C_{bc} = 176.02 \text{ мкФ}$ ,  $C_{ca} = 46.367 \text{ мкФ}$ , при которых амплитуды токов уменьшились до значения 2.945 А (рис. 5).

Таким образом, при поставленных начальных условиях было осуществлено лишь симметрирование, и в зависимости от начальных условий был найден лишь «ближайший» режим симметрирования.

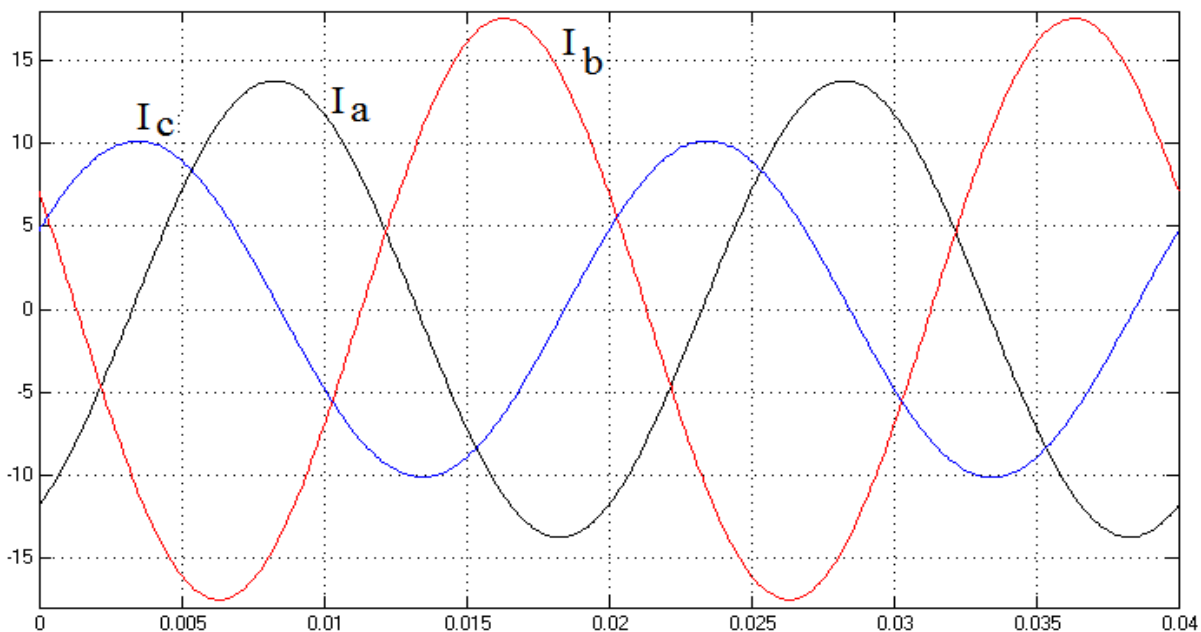


Рис. 2. Временные диаграммы сетевых токов трехфазной системы электроснабжения в несимметричном режиме

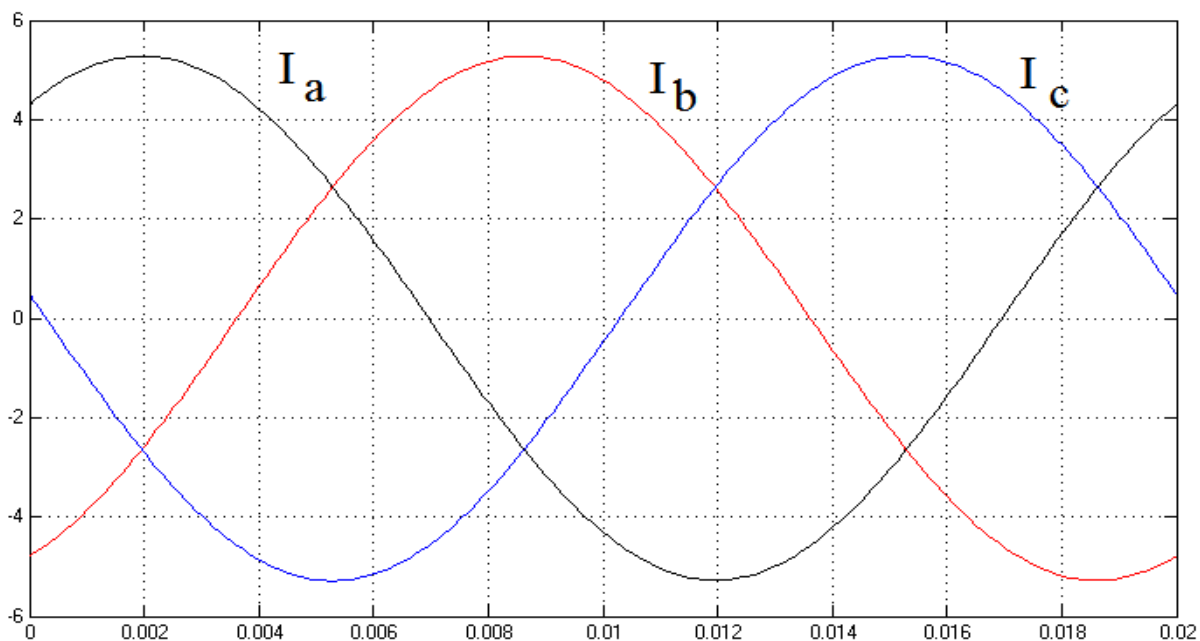


Рис. 3. Временные диаграммы сетевых токов трехфазной системы электроснабжения после оптимизации при задании начальных параметров равными  $C_{ab} = 10.1$ ,  $C_{bc} = 10.1$ ,  $C_{ca} = 10.1$

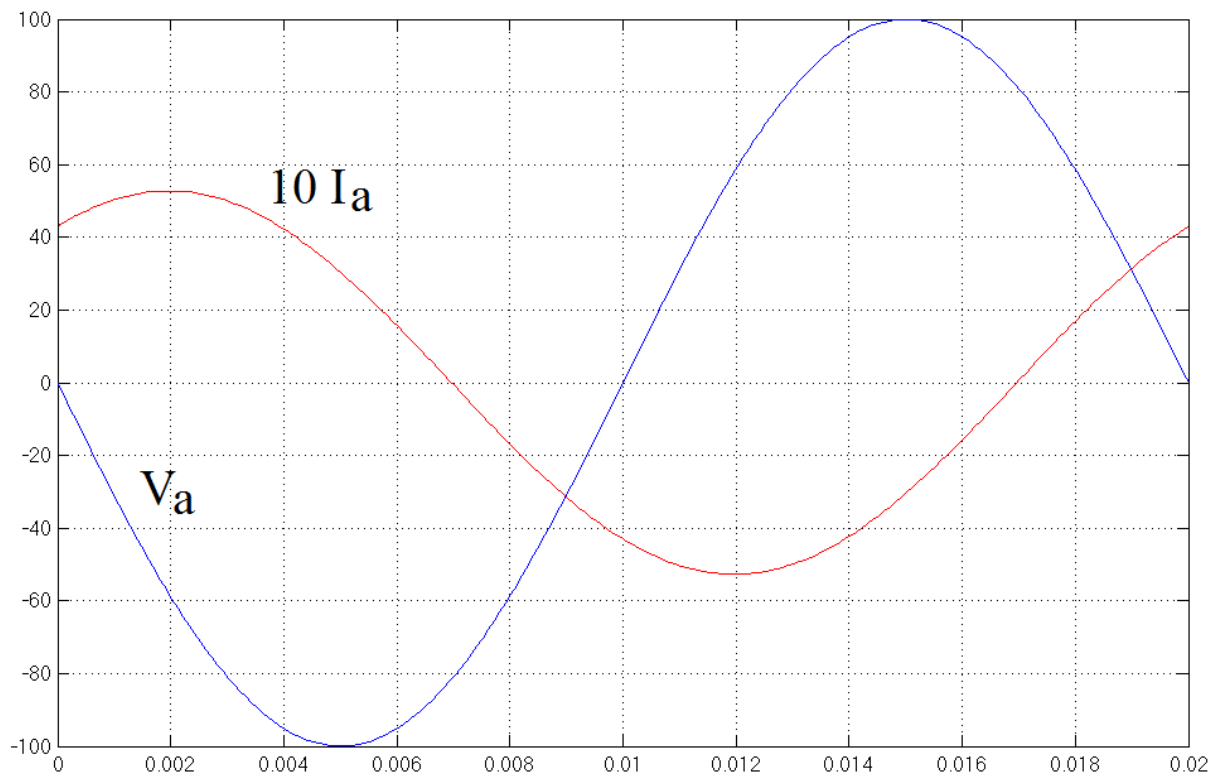


Рис. 4. Временная диаграмма напряжения и тока в фазе А после оптимизации при задании начальных параметров  $C_{ab} = 10.1$ ,  $C_{bc} = 10.1$ ,  $C_{ca} = 10.1$

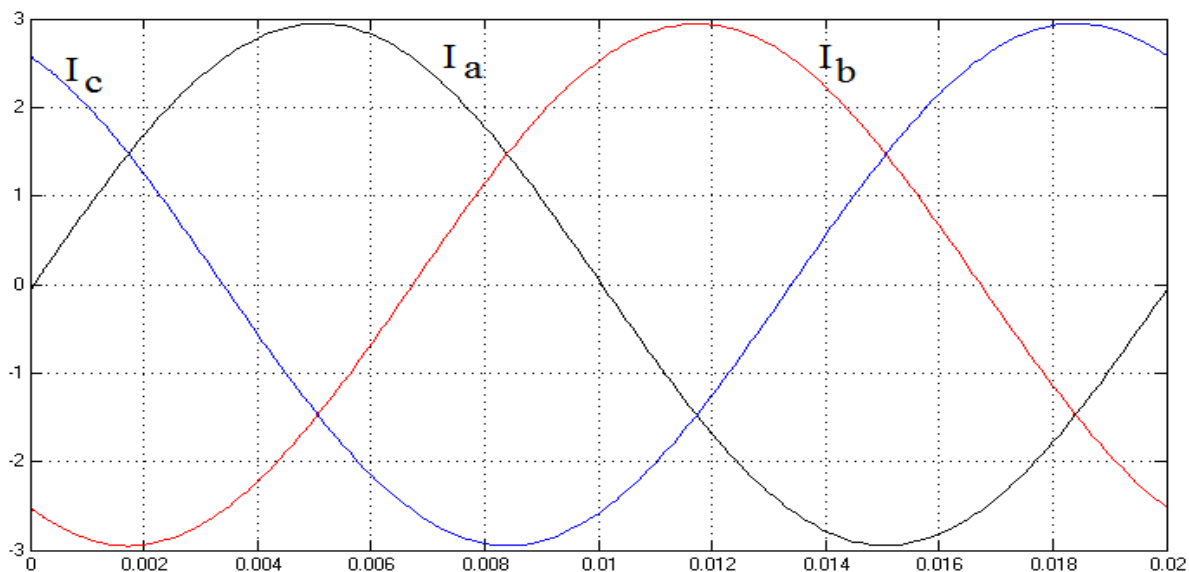


Рис. 5. Временные диаграммы сетевых токов после выполнения компенсации реактивной мощности

При изменении вектора начальных условий заданием значений емкостей равными  $C_{ab} = 70.1 \Phi$ ,  $C_{bc} = 20.1 \Phi$ ,  $C_{ca} = 5.1 \Phi$ , после выполнения оптимизации, значения емкостей конденсаторов так же изменились от найденных ранее и стали равными  $C_{ab} = 191.54 \text{ мкФ}$ ,  $C_{bc} = 151.04 \text{ мкФ}$ ,

$C_{ca} = 21.379 \text{ мкФ}$  и произошла недокомпенсация – сдвиг фаз приобрел индуктивный характер (рис. 6). Амплитуда тока при этом равна 3.761 А. Последовательным увеличением значений емкостей конденсатора на 1 мкФ была достигнута полная компенсация реактивной мощности.

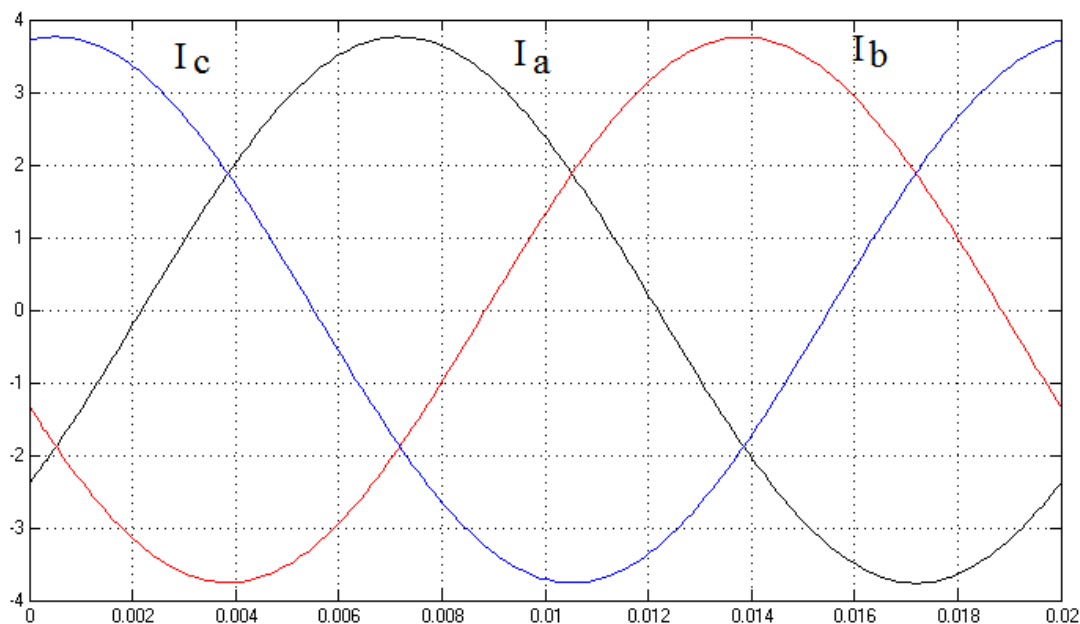


Рис. 6. Временные диаграммы сетевых токов после оптимизации при задании начальных значений емкостей  $C_{ab} = 70.1$ ,  $C_{bc} = 20.1$ ,  $C_{ca} = 5.1$



Таким образом, в результате выполнения поисковой оптимизации при задании различных начальных значений величин емкостей достигнута симметрия сетевых токов.

Для перехода к двухэлементной системе симметрирования значения емкостей конденсаторов можно определить вычитанием наименьшей величины

емкости конденсатора из больших величин емкостей [3]. Наименьшая емкость равна  $C_{ca} = 46.367 \text{ мкФ}$ . Вычитая это значение из найденных, получим  $C_{ab} = 170.153 \text{ мкФ}$ ,  $C_{bc} = 129.653 \text{ мкФ}$ ,  $C_{ca} = 0 \text{ мкФ}$ .

При запуске модели с отключением емкости  $C_{ca}$  и заданием указанных параметров  $C_{ab}$  и  $C_{bc}$  токи сети стали полностью симметричными (рис. 7).

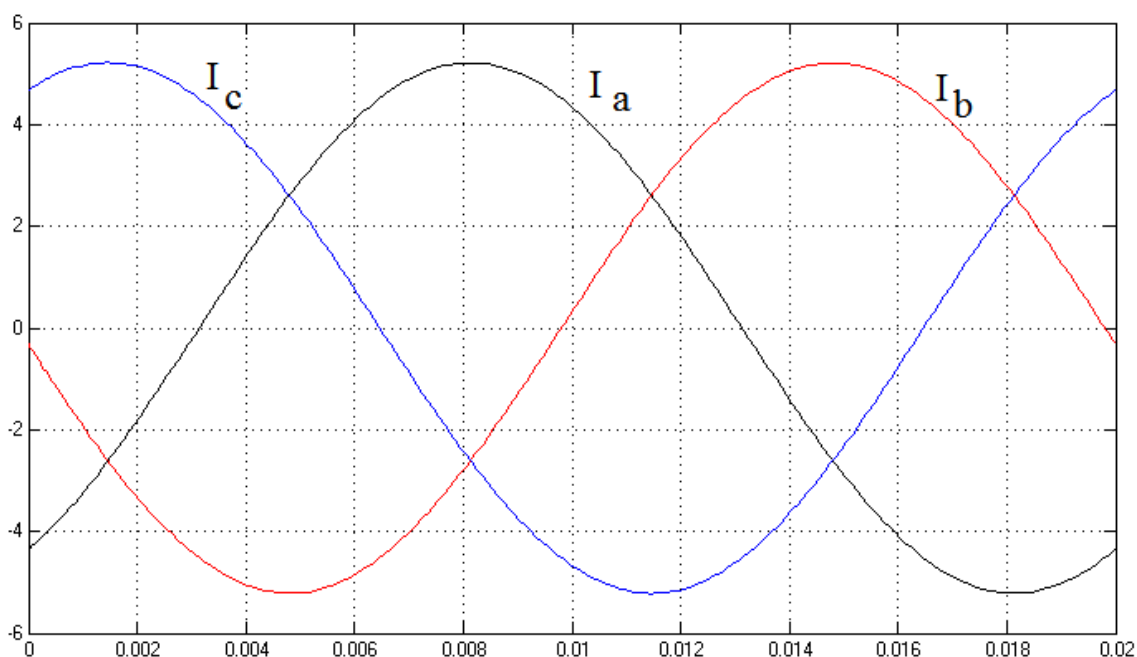


Рис. 7. Временные диаграммы сетевых токов трехфазной системы электроснабжения, отсимметрированных двухэлементной системой симметрирования

#### Выводы:

1. Для реализации поисковой оптимизации сформирована целевая функция и определены параметры оптимизации. Целевая функция составлена как среднеквадратичный функционал, в котором используются действующие значения напряжений, замеренные на зажимах нагрузки. Параметрами оптимизации являются величины емкостей симметрирующих конденсаторов.

2. Разработана компьютерная модель трехфазной трехпроводной системы электроснабжения, в которой потребление реактивной мощности от сети снижается

практически до нуля благодаря подключению симметрирующего устройства.

3. В результате проведения поисковой оптимизации определен симметричный режим работы трехфазной системы электроснабжения, при этом амплитудные значения токов уменьшились в несколько раз.

4. Путем вращения симметрирующей системы достигнута полная компенсация реактивной мощности в системе. В таком режиме работы амплитудные значения токов в линии достигли своего минимального значения.

5. Показана возможность перехода на симметрирование токов в системе двухэлементную систему симметрирования, при которой осуществляется полное электроснабжения.

*Список использованных источников*

1. Железко, Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
2. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергия, 1977. – 128 с.
3. Шидловский, А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях [Текст] / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.
4. Mirabbasi D. Effect of unbalanced voltage on operation of induction motors and its derrection [Text] // Davar Mirabbasi, Ghodrattollah Seifossadat , Mehrdad Heidari. – Electrical and Electronics Engineering, 2009, 5–8 Nov. – pp. 189-192.
5. Khoobroo A. Effects of system harmonics and unbalanced voltages on electromagnetic performance of induction motors [Text] // Amir Khoobroo, Mahesh krishnamurthy ; Babak Fahimi ; Wei Jen Lee. – Industrial Electronics, 2008. 10-13 Nov., – pp. 1173-1178.
6. Fernando J. T. E. Ferreira. Star- and delta-connected windings tolerance to voltage unbalance in induction motors // Fernando J. T. E. Ferreira, Baoming Ge ; Enrique C. Quispe ; Aníbal T. De Almeida, Electrical Machines (ICEM), 2014, pp. 2045-2054.
7. Vinod Matta Unbalance and voltage fluctuation study on AC traction system Vinod Matta, Gaurav Kumar – IEEE, Electric Power Quality and Supply Reliability Conference 2014, pp. 303-308.
8. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
9. Annette von Jouanne. Assessment of Voltage Unbalance [Text] / IEEE Transactions on power delivery, vol. 16, no. 4, october 2001. – pp. 782-790.
10. Ягуп, В. Г. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации [Текст] / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 1. – С. 60-66.
11. Ягуп, К. В. Расчет параметров устройства компенсации реактивной мощности с использованием модели и поисковой оптимизации [Текст] / К. В. Ягуп // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 150. – С. 115-120.
12. Ягуп, К. В. Расчет параметров устройства компенсации реактивной мощности сети электроснабжения с трансформатором на визуальной модели [Текст] / К. В. Ягуп // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 25-32.
13. Ягуп, В. Г. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации [Текст] // В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – Вип. 11(186). – С.449-454.

Рецензент д-р техн. наук, профессор Я. В. Щербак

Ягуп Катерина Валеріївна, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизованих систем електричної тяги Українського державного університету залізничного транспорту.  
Тел. (057)730-10-76. E-mail. Yag.kate@rambler.ru.

Yagup Katerina Valeriivna, cand. of techn. Sciences, the senior lecture of Department of automated electric transport systems of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-76.

Стаття прийнята 23.05.2016р.

УДК 656.212.5

**АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ, ПРИСВЯЧЕНИХ РЕКОНСТРУКЦІЇ ПРОМІЖНИХ РОЗДІЛЬНИХ ПУНКТИВ ПРИ ВВЕДЕННІ ШВИДКІСНОГО РУХУ**

Кандидати техн. наук М. Ю. Куценко, О. А. Дудін, старш. викл. А. В. Рибін, інженери О. О. Сініцина, О. В. Лобода

**АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПОСВЯЩЕННЫХ РЕКОНСТРУКЦИИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РАЗДЕЛЬНЫХ ПУНКТОВ ПРИ ВВОДЕ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ**

Кандидаты техн. наук М. Ю. Куценко, А. А. Дудин, старш. препод. А.В. Рыбин, инженеры А. А. Синицина, О. В. Лобода

**ANALYSIS OF RESEARCHES WHICH ARE DEVOTED TO THE RECONSTRUCTION OF INTERMEDIATE RAILWAY STATIONS IN CASES OF HIGH-SPEED TRAFFIC**

Ph. d. M. Kutsenko, ph. d. O. Dudin, senior lecturer A. Rybin, engineer O. Sinitsina, O. Loboda

*У зв'язку з тим, що проміжні роздільні пункти являють собою складні системи, які мають свої особливості і важко піддаються типізації, існує певна проблема щодо визначення орієнтовних обсягів робіт з їх перевлаштування. У статті проведений докладний аналіз відомих досліджень, присвячених реконструкції проміжних роздільних пунктів при введенні швидкісного руху.*

**Ключові слова:** реконструкція, перебудова, колійний розвиток, проміжні роздільні пункти, швидкісний рух.

*В связи с тем, что промежуточные раздельные пункты представляют собой сложные системы, которые имеют свои особенности и трудно поддаются типизации, существует проблема по определению ориентировочных объемов работ по их переустройству. В статье проведен подробный анализ известных исследований, посвященных реконструкции промежуточных раздельных пунктов при введении скоростного движения.*

**Ключевые слова:** реконструкция, переустройство, путевое развитие, промежуточные раздельные пункты, скоростное движение.

*For a successful integration into the world community of transport Ukraine should be among the countries with the existing highways, which requires to continue relevant research, which started in the late 60-ies of the last century. Known theoretical developments now require adjustments to meet modern conditions due to changes in the rules for the design of railway stations, the ratio of the quantities of capital and operating costs.*

*Due to the fact that the railway stations items are complex systems that have their own characteristics and are difficult to typing, there is a problem to determine the approximate amount of work on their reconstruction. The article gives a detailed analysis of existing research on the reconstruction of the intermediate railway stations in cases of high-speed traffic.*

**Keywords:** reconstruction, reorganization, station tracks, intermediate railway stations, high-speed traffic.

**Вступ.** Для виходу українських залізниць на світовий транспортний ринок необхідно розвивати швидкісний і високошвидкісний рух. З цією метою розробляються програми, які передбачають реконструкцію існуючих залізничних ліній для руху пасажирських поїздів зі швидкостями до 160 – 200 км/год.

З початку будівництва залізниць підвищення швидкостей руху є одним із пріоритетних завдань, над вирішенням якого працюють практично всі провідні залізничні держави світу (Японія, Франція, Німеччина, Італія, Великобританія, США та ін.) [1–3, 11]. За перші 60 років історії залізничного транспорту максимальна швидкість була збільшена майже в два рази – з 85 км/год (1829 р.) до 144 км/год (1890 р.), а вже початок ХХ століття ознаменувався досягненням швидкісного кордону в 200 км/год (1903 р.) в ході випробувальних поїздок з використанням електричної тяги на лінії Цоссен – Маренфельд (Німеччина).

**Визначення мети та задачі дослідження.** Відомо, що при організації руху пасажирських поїздів зі швидкістю до 200 км/год потрібна реконструкція залізничної лінії; при цьому найбільшу складність являє перебудова роздільних пунктів з колійним розвитком. Особливо це відноситься до проміжних станцій і обгінних пунктів, які, як правило, не відповідають вимогам швидкісного руху і тому є ділянками обмеження швидкості. На них припадає чимала частина робіт з перевлаштування при підготовці лінії до швидкісного руху. У зв'язку з цим метою даної статті є аналіз теоретичних робіт і нормативних документів, присвячених реконструкції роздільних пунктів при введенні в обіг пасажирських поїздів зі швидкістю до 200 км/год.

**Основна частина.** Радянські вчені вже на початку ХХ століття займалися проблемами швидкісного залізничного транспорту. Так, у 1905 році Г. Д. Дубелір вперше поставив питання про будівництво

першої швидкісної електричної дороги, на якій можна було б розвивати швидкість до 250 верст/год [4, 11].

Одним з перших дослідників питань розвитку станцій при швидкісному русі після 1917 року був С. П. Бузанов. У своїй монографії до докторської дисертації він розглянув перебудову станцій і вузлів для обслуговування швидкісного руху, а також їх основні елементи. У передмові до цієї роботи академік В. М. Образцов писав: «Щоб правильно вирішити поставлену проблему залізничних станцій і вузлів, потрібно почати вивчення питання з зазначених окремих елементів, що становлять схему станцій і вузлів, тобто йти від часткового до загального».

Надалі дослідженню різних проблем розвитку швидкісного і високошвидкісного руху були присвячені роботи ряду вчених, серед яких М. І. Бещева, А. В. Болотін, М. І. Воронін, Ю. І. Єфименко, С. С. Жабров, І. П. Кисельов, М. В. Колодяжний, А. П. Кондратченко, В. В. Костенко, Ф. П. Кочнев, Б. Е. Пейсахзон, Л. З. Прасов, Є. С. Свинцов, І. В. Турбін, К. Ю. Скалов, Є. А. Сотников, В. С. Суходоев та ін.

Кожен з них займався різними аспектами організації швидкісного пасажирського руху: економічними, будівельними, експлуатаційними та ін.

У [5] розглядаються основні види робіт на проміжних роздільних пунктах при введенні швидкісного руху (до 160 км/год) відповідно до діючих на той період (1972 р.) вимог норм і правил. Так, на головних коліях в межах роздільних пунктів повинні укладатися рейки типу Р65 на щебеневому баласті, стрілочні переводи для швидкості 160 км/год; забороняється застосування перехресних стрілочних переводів і глухих перехрещень на коліях безупинного пропуску поїздів, радіуси кривих ділянок колії повинні бути не менше 2000 м, не допускається розташування пасажирських платформ між головними коліями. Як приклад, наведена схема перебудови проміжної станції

(рис. 1), де на підході з боку станції А є криві малих радіусів, на головних коліях покладений перехресний стрілочний перевід, а між ними – пасажирська платформа. В результаті реконструкції

влаштовується загальна крива радіусом 2000 м, проміжна пасажирська платформа вноситься з міжколійя головних колій, перехресний стрілочний перевід замінюється двома звичайними.

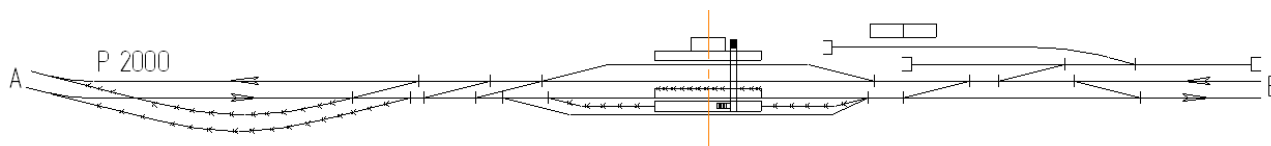


Рис. 1. Приклад перебудови проміжної станції для швидкісного руху

Великий внесок у розвиток теорії підвищення швидкостей руху як пасажирських, так і вантажних поїздів, зробив проф. Ф. П. Кочнев. В [6] доцільність підвищення швидкостей руху поїздів визначається виходячи з підрахунку річних приведених витрат на випрямлення кривих і укладання більш потужних стрілочних переводів, рейко-шпальної решітки та ін. Також ним розглянуті умови переходу до будівництва спеціалізованих ліній для високошвидкісного руху пасажирських поїздів.

В. В. Костенко запропонував методика вибору основних параметрів стрілочних переводів для ВШМ, визначив втрати часу на проходження поїздами зони обмеження швидкості, будь то стрілочний перевід або роздільний пункт в цілому.

У роботі Є. М. Масловської розглядається методика оцінки параметрів плану головних колій при змішаному пасажирському та вантажному русі, а також методика техніко-економічного обґрунтування положистості стрілочних переводів для швидкісного руху, згідно з якою оптимальна положистість стрілочного переводу для розглянутого випадку відповідає маркам 1/32 – 1/34.

Групою авторів у ЛІЗТі був розроблений метод типових схем перебудови [7], який дозволяє визначити орієнтовні обсяги робіт на реконструкцію роздільних пунктів на підставі їх ділення на

чотири характерні типи. Відзначимо, що у формулах для підрахунку обсягів робіт по станціях не були враховані головні колії, так як ці витрати включалися в перебудову траси. В даний час прийнято за доцільне включати головні колії в перебудову роздільного пункту і розглядати його як комплексну ділянку обмеження швидкостей руху пасажирських поїздів [4, 11]. Середню швидкість проходження поїздів через станцію можна визначати методом «еталонного перегону», запропонованим Б. Е. Пейсахзоном.

Значне число досліджень присвячено реконструкції лінії Ленінград – Москва. Наприклад, в [8] визначалися оптимальні градації швидкості для станцій, які, виходячи з характеру роботи, схеми колійного розвитку, плану головних колій, були розбиті на чотири групи (рис. 2):

- I і II групи – проміжні станції, розташовані у плані відповідно на прямій і частково на кривій;

- III і IV групи – дільничні і колишні дільничні станції відповідно з боковим і острівним розташуванням пасажирської будівлі (платформи) в уширеному міжколійї головних колій.

У підсумку для всіх розглянутих у [8] станцій лінії мінімум наведених витрат відповідав у той час швидкості 200 км/год, лише для станції Окуловка – 160 км/год.

В [9] розглядаються питання, присвячені етапності реконструкції станцій

з урахуванням перспективи запровадження швидкісного руху пасажирських поїздів. Авторами пропонується наступний порядок реконструкції.

По-перше, вона повинна здійснюватися в два етапи, на першому з яких виконуються роботи, що враховують перспективу введення швидкісного руху, а на другому – роботи при безпосередньому введенні швидкісного руху.

По-друге, всі роботи з розвитку станцій можна розділити на дві групи:

- ті, що незначно збільшують капітальні витрати в період реконструкції;

- ті, що істотно збільшують капітальні витрати на I етапі, але суттєво знижують їх на II етапі при підготовці лінії до швидкісного руху.

Особливо слід звертати увагу на роботи першої групи, так як вони без збільшення або при незначному збільшенні капітальних витрат на I етапі дозволяють врахувати деякі вимоги до роздільних пунктів при переведенні в перспективі лінії на швидкісний рух (розміщення граничних стовпчиків, ізолюючих стиків, пасажирських платформ, стрілочних переводів на головних коліях).

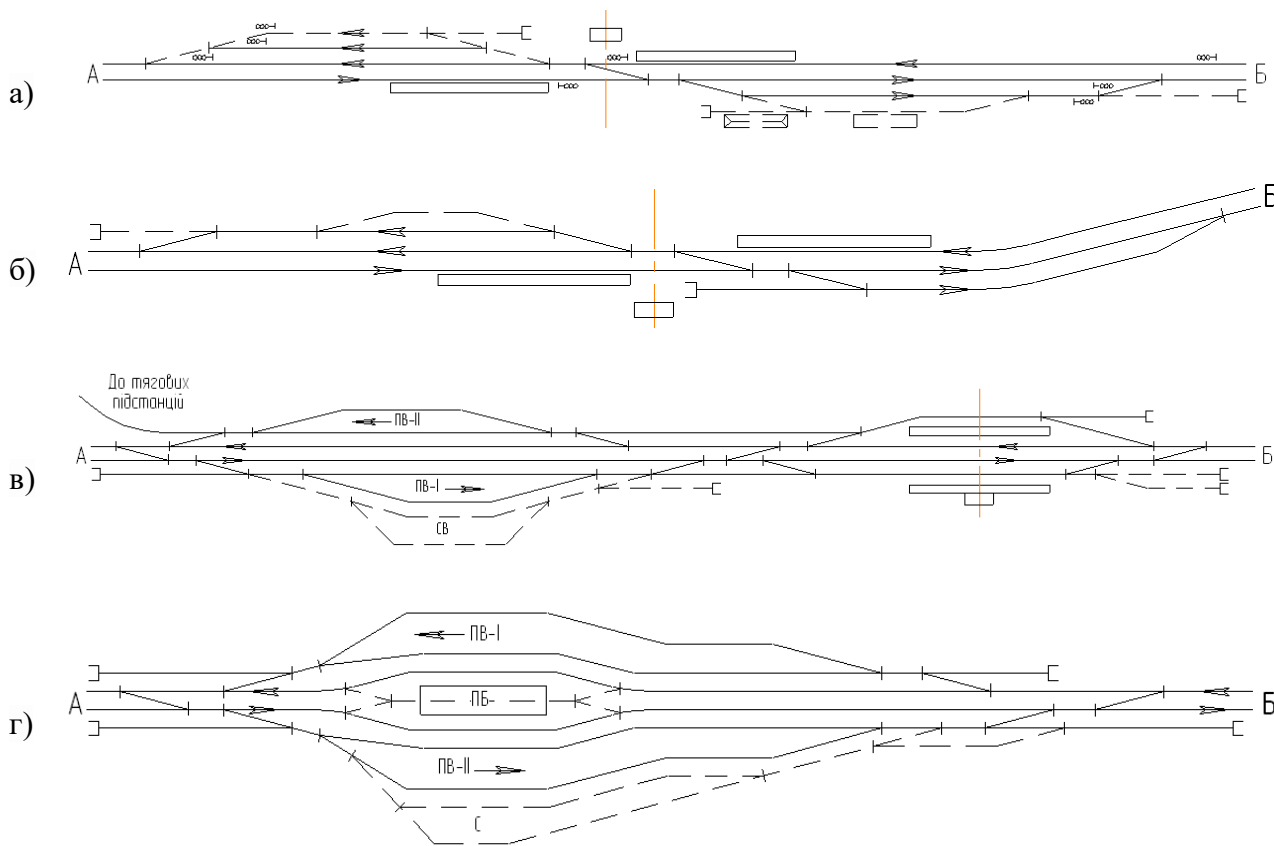


Рис. 2. Принципові схеми станцій:  
а – I групи; б – II групи; в – III групи; г – IV групи

Застосування двох варіантів розподілу робіт по етапах і вибір оптимального з них по мінімуму приведених витрат дозволяє знизити загальні капітальні витрати. Цей

порядок також рекомендується використовувати і при реконструкції роздільних пунктів одноколійних ліній при будівництві другої головної колії на

перспективних для швидкісного руху магістралях.

Питанням визначення капітальних витрат на перебудову головних колій в залежності від градації швидкості руху поїздів займався Л. З. Прасов. Ним проаналізовані різні поєднання довжин таких елементів, як пряма і крива, що дозволило визначити довжину перебудови.

Є. А. Рижик визначає оптимальну етапність реконструкції залізничного напрямку. Автор, враховуючи, що введення швидкісного руху має свою специфіку і скорочення часу ходу, що отримується на етапах реконструкції, має забезпечувати графік руху, зручний для врахування інтересів потенційних пасажирів, вводить додатковий критерій – рейтинг поїзда.

Так як на обсяги робіт великий вплив робить наявність кривих в межах роздільних пунктів і їх параметри, то слід відзначити дослідження в цій галузі. Над питаннями розробки технічних вимог до плану й профілю на швидкісних і високошвидкісних лініях (радіуси кривих, довжини перехідних кривих, підвищення зовнішньої рейки, довжини прямих вставок) працювали Н. І. Бещева,

А. В. Гавриленков, С. С. Жабров, О. П. Єршков, А. І. Іоаннісян, І. І. Кантор, В. Ю. Козлов, А. П. Кондратченко, Л. З. Прасов, І. В. Турбін, Є. А. Рижик та ін. На жаль, більшість цих досліджень присвячено кривим на лініях в цілому без урахування впливу на перебудову роздільних пунктів.

В. Ю. Козлов приділив увагу визначенню економічно раціональної кількості швидкісних пасажирських поїздів [10]. Питаннями спільної експлуатації ВШМ та технічного переоснащення існуючих залізниць займалися С. М. Бушляєв, А. М. Шинов.

**Висновки.** Аналізуючи проведені дослідження, слід зазначити, що питання перебудови роздільних пунктів, які розглядаються при підготовці ліній до швидкісного руху, як ділянка обмеження швидкості поїздів, на сьогоднішній день досліджено недостатньо повно. Крім того, з огляду на те, що проміжні роздільні пункти є численними і складними системами, що мають свої особливості і важко піддаються типізації, існує проблема визначення орієнтовних обсягів робіт з їх перебудови.

### *Список використаних джерел*

1. Clewlow, R. R. The impact of high-speed rail and low-cost carriers on European air passenger traffic [Text] / R. R. Clewlow, J. M. Sussman, H. Balakrishnan // *Transport Policy*. – 2014. – Vol. 33. – P. 136-143.
2. High-speed railway scheduling based on user preferences [Text] / J. Espinosa-Aranda [et al.] // *European Journal of Operational Research*. – 2015, November. – Vol. 246. – P. 772-786.
3. Environmental risks of high-speed railway in China: Public participation, perception and trust [Text] / Guizhen He [et al.] // *Environmental Development*. – 2015, April. – Vol. 14. – P. 37-52.
4. Будущее европейских высокоскоростных сообщений [Текст] // *Железные дороги мира*. – 2002. – № 3. – С. 12-14.
5. Развитие и реконструкция станций и узлов [Текст] / К. Ю. Скалов, И. Е. Савченко, Е. А. Ветухов [и др.]. – М.: Транспорт, 1972. – 286 с.
6. Костенко, В. В. Выбор основных параметров стрелочных переводов для высокоскоростных магистралей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08 / Костенко Владимир Васильевич. – СПб., 1997. – 23 с.

7. Методические указания по определению сметной стоимости строительства объектов железнодорожного транспорта [Текст]. – М.: МПС России, 2003. – 35 с.

8. Методические указания по проектированию железнодорожных узлов и станций. Новое в нормах и правилах проектирования станций и узлов [Текст]. – К., 1977. – 29 с.

9. Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, узлов и станций [Текст] / А. М. Козлов, К. К. Таль. – М.: ВПТИТРАНССТРОЙ, 1988. – 468 с.

10. Николаев, С. К. Искушение скоростью [Текст] / С. К. Николаев // Гудок. – 2005. – №220. – С.7.

11. Медведева, Н. В. Переустройство промежуточных отдельных пунктов для повышения скорости движения пассажирских поездов до 200 км/ч [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Медведева Наталья Владимировна. – СПб., 2008. – 188 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор Є. С. Альошинський

---

Куценко Максим Юрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42.

E-mail: maksimus84@meta.ua.

Дудін Олексій Аркадійович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42.

E-mail: aadudin@ukr.net.

Рибін Андрій Вікторович, старший викладач кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-36. E-mail: rybinandrey2006@mail.ua.

Сініцина Олександра Олександрівна, студентка магістратури НН ІППК Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42.

Лобода Ольга Валеріївна, студентка магістратури НН ІППК Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42.

Kutsenko Maxim Yriyovich Ph. D., associate professor department of train stations and nodes Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-42 E-mail: maksimus84@meta.ua.

Dudin Olexiy Arkadiyovich Ph. D., associate professor department of track and railroad facilities Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: aadudin@ukr.net.

Rybin Andriy Victorivich, senior lecturer department of cars Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-36. E-mail: rybinandrey2006@mail.ua.

Sinitsyna Olexandra Olexandrivna graduate student NN IPPK Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-42.

Loboda Olga Valeriivna graduate student NN IPPK Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-42.

Стаття прийнята 23.05.2016 р.



УДК 624.012:53.09

## РАСЧЕТ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ ПО УТОЧНЕННЫМ И УПРОЩЕННЫМ МЕТОДАМ

Д-р техн. наук С. Л. Фомин, канд. техн. наук И. А. Плахотникова,  
студентка А. А. Парафенко (ХНУСА)

## РОЗРАХУНОК ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ ЗА УТОЧНЕНИМИ І СПРОЩЕНИМИ МЕТОДАМИ

Д-р техн. наук С. Л. Фомін, канд. техн. наук І. А. Плахотникова,  
студентка А. О. Парафенко (ХНУБА)

## CALCULATION OF FIRE CONCRETE FLOOR SLABS REFINING AND SIMPLIFIED METHOD

Dr. Sc. Sciences S. L. Fomin, cand. tehn. sciences I. A. Plahotnikova Sciences,  
Student A. A. Parafenko

*Проведены численные исследования расчета огнестойкости железобетонных конструкций по уточненным и упрощенным методам на примерах расчета железобетонных плит перекрытия. Разработан уточненный метод расчета, основанный на использовании компьютерных технологий, нелинейных методов, учитывающий изменение механических свойств материалов от температуры. Проведенные расчеты железобетонной плиты по различным методам показали, что наибольшей достоверностью обладает предложенный уточненный метод расчета.*

**Ключевые слова:** огнестойкость, упрощенные методы расчета, нелинейный уточненный метод, сравнение результатов расчетов.

*Проведено чисельні дослідження розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій за уточненими і спрощеними методами на прикладах розрахунку залізобетонних плит перекриття. Розроблено уточнений метод розрахунку, заснований на використанні комп'ютерних технологій, нелінійних методів, що враховує зміну механічних властивостей матеріалів від температури. Проведені розрахунки залізобетонної плити за різними методиками показали, що найбільшою вірогідністю володіє запропонований уточнений метод розрахунку.*

**Ключові слова:** вогнестійкість, спрощені методи розрахунку, нелінійний уточнений метод, порівняння результатів розрахунків.

*Numerical study of calculation of fire resistance of reinforced concrete structures according to updated and simplified methods is performed on concrete slabs. Calculations are considered elements using tables method isotherm 500 ° C, zone method. A revised calculation method based on the use of computer technology, nonlinear methods, based on the basic principles and assumptions of the theory of heat conduction, certain principles and assumptions of structural mechanics, which takes into account changes in mechanical properties with temperature.*

*For the creation of non-linear analysis of finite element calculation scheme can be carried out in two ways. First, the simplest, involves the use of a physically nonlinear finite element versatile rod for columns and physically nonlinear universal rectangular shell (and / or triangular*

shell) for overlap. The second option is more complicated, but more accurate, based on a physically non-linear finite element space, for example, physically nonlinear isoparametric universal octagonal space.

Calculations of concrete slabs on various methods, which showed that the greatest certainty has proposed a revised calculation method.

**Keywords:** fire, easy payment methods, nonlinear refined method, the comparison of the calculation results.

**Вступление.** Предельное состояние конструкции по огнестойкости – состояние конструкции, при котором она теряет несущую способность или защитные функции в условиях пожара.

Различают три предельных состояния конструкций по огнестойкости:

- 1) предельное состояние по признаку потери несущей способности (R);
- 2) предельное состояние по признаку потери целостности (E);
- 3) предельное состояние по признаку потери теплоизолирующей способности (I) [1].

При проектировании используются методы с опорой на следующее: 1) расчет отдельных элементов; 2) расчет частей сооружения; 3) расчет сооружения в целом.

При расчете отдельных элементов, который включает применение упрощенных методов – табличных данных, учитывается только влияние перепадов (градиентов) температур в поперечном сечении; эффектами температурного расширения в осевом направлении или в плане пренебрегают. Кроме того, предполагается, что граничные условия в течение пожара остаются неизменными [2].

Если рассчитывается часть сооружения, она изолируется таким образом, что при расчете могут быть приняты стационарные (неизменные во времени) граничные условия. В пределах изолированной части сооружения должен учитываться соответствующий вид разрушения при огневом воздействии, применяются упрощенные методы, не применяются табличные данные, используют свойства материалов,

зависящие от температуры, эффекты теплового расширения и деформации.

При расчете всего сооружения не используется ни одна из рассмотренных выше предпосылок, проводится общий уточненный расчет с учетом зависящих от температуры свойств материалов, жесткости элементов, эффектов теплового расширения и деформаций. В Еврокоде [3] приводится лишь краткое руководство для второго и третьего из вышеперечисленных методов.

Приведенные «альтернативные методики расчета» имеют разную степень достоверности и не могут обеспечить гарантированную надежность пожарной безопасности зданий и сооружений, хотя каждая из методик имеет свою научную и практическую ценность. По мнению французских исследователей Б. Бартелими и Ж. Крюппа [4], эти методы, разработанные на основе экспериментальных исследований, касаются лишь частных случаев, а их простота оплачивается недостаточно обеспеченной безопасностью. В частности, в них не учитывается напряженное состояние конструкций, поэтому наиболее надежным является общий (третий) метод проверки.

Поставлена проблема изучения различия указанных методик на примерах расчета огнестойкости железобетонных плит перекрытия по уточненным и упрощенным методам.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Как было указано ранее, в таблице 0.1 Еврокода [3] приводятся лишь основные положения уточненных моделей расчета для третьего метода. Они должны базироваться на фундаментальных

физических предпосылках, которые приводят для получения наиболее достоверных данных об ожидаемой работе соответствующего конструктивного элемента во время пожара (п.4.3.1-4.3.2 [3]). Уточненные методы включают расчетные модели для определения следующего: увеличения и распространения температуры во всех элементах конструкции (теплотехнический расчет); механической работы конструктивной системы или какой-либо ее части (статический расчет). Уточненные методы расчета для теплотехнической части должны базироваться на основных принципах и допущениях теории теплопроводности; для статической части – базироваться на определенных принципах и допущениях строительной механики, учитывая изменение механических свойств от температуры.

Таким образом, в Еврокоде [3] сформулированы основные требования для создания расчетной модели уточненного метода. Инженерная методика отсутствует, что вынуждает при проектировании использовать упрощенные методики, рассмотренные ниже.

**Расчет элементов с использованием таблиц.** Область применения

В разделе 5 EN 1992-1-2 [3] установлены минимальные размеры и расстояния от поверхности элемента до центра тяжести ближайшего к ней ряда арматуры (защитный слой бетона плюс половина диаметра арматурного стержня) для различных типов конструктивных элементов при воздействии огня в течение 30, 60, 90, 120, 180 и 240 мин. Также приведены некоторые требования по конструированию. Рассматриваются такие элементы, как колонны, несущие и ненесущие стены, балки (шарнирно опертые и неразрезные), плиты (шарнирно опертые и неразрезные, одно- и двухпролетные плиты, сплошные и ребристые, а также плоские плиты).

Табличные значения применимы к бетону на кремнеземистых заполнителях плотностью в диапазоне 2000-2600 кг/м<sup>3</sup>. Если используется легкий заполнитель, табличные значения минимальных размеров плит и балок могут быть снижены на 10 %.

Еврокод требует устройства приповерхностного армирования для предотвращения разрушения защитного слоя бетона, если расстояние от поверхности элемента до центра тяжести ближайшего к ней ряда арматуры (осевое расстояние) превышает 70 мм.

#### **Обоснование табличных данных.**

Таблицы разработаны на эмпирической основе, на базе общеевропейского опыта и теоретической оценки результатов испытаний. Данные для обычных типов конструктивных элементов получены с использованием приближенных и консервативных допущений [5].

Если толщина стен и плит соответствует минимальным размерам, можно предположить, что критерии по целостности и изоляции для разделительной функции удовлетворяются.

Для функции восприятия нагрузки применимы следующие допущения:

$$E_{d,fi}/R_{d,fi} \leq 1,0, \quad (1)$$

где  $E_{d,fi}$  – расчетный эффект воздействия в условиях пожара;

$R_{d,fi}$  – расчетное сопротивление элемента в условиях пожара.

Если не указано иное, предполагается, что

$$\eta_{fi} = E_{d,fi}/E_d = 0,7, \quad (2)$$

где  $E_d$  – расчетный эффект воздействий при нормальной температуре.

Критической температурой для арматуры,  $\theta_{cr}$  (температура арматуры, при которой в условиях пожара при данном уровне напряжения стали предполагается

разрушение элемента) является температура  $500^{\circ}\text{C}$ . При этом принимается, что уровень напряжения равен  $\sigma_{s,fi} / f_{yk} = 0,6$ ,  $\eta_{fi} = 0,7$  и  $\gamma_s = 1,15$ .

Для предварительно напряженных арматурных элементов  $\theta_{cr} = 400^{\circ}\text{C}$ , для предварительно напряженной проволочной и прядевой арматуры  $\theta_{cr} = 350^{\circ}\text{C}$ . Уровень напряжений и для тех, и для других принимается равным 0,55.

Толщина плит приведена в таблицах в целях обеспечения адекватности разделительной функции и может в дополнение к толщине конструкции перекрытия включать толщину любого несгораемого покрытия пола.

Осевое расстояние, приведенное в таблицах, необходимо сравнить так: 1) с осевым расстоянием до отдельного ряда арматуры того же самого диаметра; 2) с увеличенным осевым расстоянием стержней в случае многорядного армирования или арматуры различных диаметров.

**Элементарные методы расчета.** В приложениях В и Е [3] приведены три метода расчета, которые нашли применение на практике.

**Метод изотермы  $500^{\circ}\text{C}$ .** Данный метод требует знания о распределении температур по поперечному сечению элемента. В приложении А к EN 1992-1-2 [3] приводится такое распределение температур для плит, балок и колонн с учетом стандартной зависимости «время - температура». Метод может быть применен к элементам, минимальная ширина поперечного сечения которых удовлетворяет значениям, указанным в табл. В.1 [3].

Сначала определяется толщина зоны, поврежденной тепловым воздействием. Она определяется как средняя глубина изотермы  $500^{\circ}\text{C}$ , расположенной в сжатой зоне поперечного сечения. Поврежденный бетон исключается из расчета в предположении, что он не участвует в восприятии нагрузок. Считается, что

оставшееся поперечное сечение сохраняет исходные параметры по сопротивлению и модулю упругости.

Несмотря на то, что некоторые арматурные стержни могут располагаться за пределами уменьшенного поперечного сечения, они все же принимаются в расчет. При вычислениях сопротивление всей арматуры уменьшается путем применения понижающих коэффициентов для соответствующей температуры.

Таким образом, с учетом приведенных выше предпосылок задача сводится к вычислению сопротивления поперечного сечения с использованием методов расчета для нормальных температурных условий.

**Метод зон.** Данный метод является более трудоемким, но более точным, чем метод изотермы  $500^{\circ}\text{C}$ . Первым этапом расчета является определение толщины  $a_z$  зоны, поврежденной при пожаре. Эта процедура выполняется для эквивалентной стены, подвергнутой воздействию огня с обеих сторон. Толщина эквивалентной стены – это действительная толщина элементов, подвергнутых воздействию огня с противоположных сторон (например, стен, ребер балок, прямоугольных колонн). Эта толщина в два раза превышает действительную толщину, если элементы были подвергнуты воздействию огня только с одной стороны (например, плиты). Процедура заключается в следующем: половина толщины эквивалентной стены делится на ряд (минимум 3) параллельных зон.

Используя рис. В.5,а или графики в разделе 4 EN 1992-1-2 [3], в сочетании с температурным профилем в приложении А [3], оценивается коэффициент снижения ( $k_c(\theta_i)$ ) в центре каждой зоны и по средней линии эквивалентной стены ( $k_c(\theta_m)$ ). В Еврокоде приводятся формулы для расчета среднего коэффициента понижения для половины ширины эквивалентной стены и толщины поврежденного сечения  $a_z$ .

Расчет сопротивления с уменьшенным поперечным сечением продолжается далее по методу изотермы 500°C.

**Метод приложения Е.** Это полезное приложение для расчета сопротивления балок и плит, подвергнутых воздействию пожара. Рекомендации даны для свободно опертых и неразрезных элементов.

**Определение цели и задач исследования.** Целью исследования является оценка надежности расчета огнестойкости железобетонных конструкций различными методами. Задачами исследования поставлено сравнение результатов расчетов по уточненным и упрощенным методам на примерах расчета огнестойкости железобетонных плит перекрытия.

**Основная часть исследования. Расчет уточненным методом.** В ХНУСА разработан уточненный метод расчета, основанный на анализе всей конструктивной системы, когда любая или только одна из ее частей находится под влиянием пожара [6]. Методика расчета ориентирована на использование компьютерных технологий, например, нелинейных методов ПК Лира.

По ДБН В.1.1-7 [7] выбирают степень огнестойкости здания и соответствующие классы огнестойкости  $t_{fi, requ}$  строительных конструкций в минутах по ряду: 30; 60; 90; 120; 180; 240.

Расчет проводится по признаку потери несущей способности (R).

Расчетные пределы огнестойкости конструкций  $t_{fi, d}$  сравнивают с нормированными значениями. Конструкция соответствует нормированной степени огнестойкости, если соблюдается условие

$$E_{d, t, fi} \leq R_{d, t, fi}, \text{ то } t_{fi, d} \geq t_{fi, requ}, \quad (3)$$

где  $R_{d, t, fi}$  – расчетное значение несущей способности отдельной конструкции в процессе пожара в момент времени  $t$ ;

$E_{d, t, fi}$  – расчетное значение загрузочного эффекта в процессе пожара в момент времени  $t$ .

Нагрузки на конструкцию принимают как для расчета при нормальных температурах, если есть вероятность их действия при пожаре.

Как показало проведенное исследование, применение мощного аппарата метода конечных элементов в линейной постановке не позволяет произвести оценку предельного состояния из-за отсутствия критериев его появления. Необходим учет физической нелинейности материалов.

ПК Лира дает возможность проводить численное моделирование нелинейных нагружений, в результате которого выявляется полная картина разрушения для каждого элемента. Для нелинейного расчета создание конечноэлементной расчетной схемы может осуществляться по двум вариантам.

Первый, наиболее простой, предполагает применение физически нелинейных универсальных стержневых конечных элементов КЭ210 для колонн и физически нелинейных универсальных прямоугольных КЭ241 оболочки (и/или треугольных КЭ242 оболочки) для перекрытия.

Второй вариант более сложный, но более точный, основан на использовании физически нелинейных пространственных конечных элементов, например, физически нелинейных универсальных пространственных восьмиугольных изопараметрических КЭ236.

Расчет температурных усилий в конструкциях с использованием программных комплексов проводится при условии линейного распределения температуры по сечению элементов и задании для КЭ стержневых элементов температуры на верхней  $t_1$  и нижней  $t_2$  поверхности, для КЭ пластин, плит, оболочек – средней температуры  $T_1 = (t_1 + t_2) / 2$  и температурного перепада  $T_2 = t_1 - t_2$ . При

нелинейном распределении температуры в сечении элемента возникают собственные температурные напряжения, которые влияют на общие температурные деформации плоского сечения. Потому эквивалентные температуры  $t_1$  и  $t_2$  необходимо определять с учетом этих напряжений, т.е. определять эквивалентные температуры, соответствующие температурной кривизне при возникновении собственных температурных напряжений. Из этой линейной аппроксимации определяются граничные эквивалентные температуры  $t_1$  и  $t_2$ . По реальным температурам назначаются свойства материалов, диаграмм « $\sigma - \varepsilon$ » бетона и арматуры, по эквивалентным температурам определяются температурные усилия, напряжения, температурные деформации.

Погрешность применения конечных элементов стержневого и оболочечного типа возникает в связи с тем, что даже с учетом физической нелинейности в них нельзя смоделировать различный нагрев по сечению.

Для второго варианта при использовании физически нелинейных пространственных конечных элементов определение эквивалентной температуры не требуется. Плита перекрытия по высоте набирается из достаточного количества КЭ, в каждом из которых по результатам решения теплотехнической задачи задается постоянная температура либо температурный перепад. Эти данные служат одновременно для назначения прочностных и деформационных характеристик материалов и для определения температурных напряжений, усилий, деформаций.

Для проведения упругих и неупругих расчетов в программных комплексах требуются также значения модулей упругости сжатого  $E_{c,\theta}$  бетона, деформаций  $\varepsilon_{cl,\theta}$ , соответствующих прочности на сжатие  $f_c$ ,  $\theta$ , предельных деформаций  $\varepsilon_{cu,\theta}$ ,  $\varepsilon_{tcu,\theta}$  и предельных напряжений  $\sigma_{cu,\theta}$  и  $\sigma_{tcu,\theta}$ .

Процедура расчета содержит задание в каждом конечном элементе реальной или эквивалентной температуры, модулей упругости и расчетных сопротивлений бетона и арматуры, соответствующих их реальным температурам, определение жесткостей элементов путем задания закона нелинейного деформирования и при наличии арматуры в элементе ее процента вдоль всех осей, моделирование нелинейных загрузений, состоящее в формировании их последовательности.

Характеристики нелинейности в ПК Лира для основного материала – бетона принимаются по заданной экспоненциальной зависимости с учетом влияния температуры нагрева путем введения понижающих коэффициентов условия работы на модуль упругости, прочность, предельные относительные деформации бетона. Для армирующего материала выбирается также зависимость нелинейности с учетом влияния температуры нагрева путем введения понижающих коэффициентов условия работы на модуль упругости, прочность, предельные относительные деформации арматуры. При арматуре стержневого типа (физический эквивалент сетки в процентах армирования) с указанием двух слоев задается процент армирования сетки по оси  $Y$ , по оси  $X$  и привязка стержней к средней поверхности  $Z$  для плиты и необходимого количества стержней для колонн.

Моделирование нелинейных загрузений производится путем формирования последовательности загрузений, например 1-го (собственный вес и постоянной нагрузки на секцию плиты), 2-го (временной нагрузки), и 3-го (температурных воздействий на секцию плиты и колонн) с выбором простого шагового метода расчета, при числе максимальных итераций 300, 50 равномерных шагов расчета, учета предистории предыдущих загрузений и вывода на печать перемещений и усилий после каждого шага.

Разрушение конструкций может не произойти, о чем свидетельствует реализация всего количества заданных, например, 50 шагов, т.е. выполняется условие (1) – огнестойкость достаточна. В противном случае расчет останавливается на определенном, например, на 39 шаге третьего локального нагружения. При этом фиксируется для первого варианта расчета средняя температура плиты, равная  $T_1$ , и температурный перепад  $T_2$ , из которых легко определить температуры  $t_1$  и  $t_2$  на противоположных гранях плиты. Из анализа семейства кривых, определяющих нестационарное температурное поле в плите заданной толщины, определяется время, соответствующее этим температурам. Для второго варианта расчета фиксируются температуры в объемных элементах, по которым определяется время наступления предельного состояния.

При несоблюдении условия (1) после разработки мероприятий по повышению

огнестойкости конструкций расчет повторяется. ПК Лира позволяет проследить характер разрушений конечных элементов, причины разрушений, оставшийся ресурс каждого из них, показать характер трещинообразования и направление трещин.

Разработанная методика расчета несущей способности конструкций и рабочих нагрузок в условиях пожара позволяет прогнозировать изменение состояния зданий, разработать сценарии опасных ситуаций с учетом различных комбинаций нагрева, разработать предложения по обеспечению необходимой огнестойкости здания.

**Примеры расчета плиты по различным методам.** В работе [8] была рассчитана на огнестойкость по упрощенным методам полоса свободно опертой железобетонной плиты сплошного сечения шириной 1000 мм, длиной 5000 мм, толщиной 200 мм (рис. 1).

Расчетная схема, нагрузки и усилия

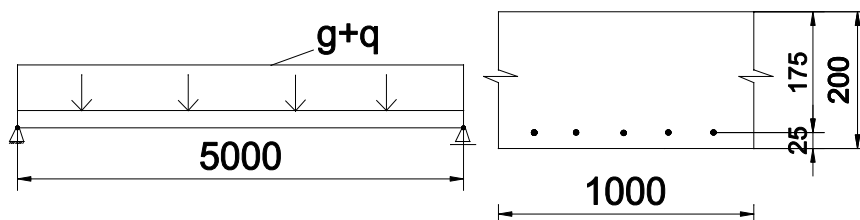


Рис. 1. Расчетная схема плиты

#### Исходные данные

Бетон класса C20 / 25 ( $f_{ck} = 20$  МПа,  $\gamma_c = 1,5$ ), защитный слой  $s = 20$  мм):

- продольное армирование:  $\varnothing 10 / 15$  ( $A_s = 5,24$  см<sup>2</sup>), прочность  $f_{yk} = 500$  МПа,  $\gamma_s = 1,15$ , горячекатаная, класс N, расстояние до оси арматуры  $a = 25$  мм;
- нормативный предел огнестойкости 90 минут (R90), нагрев плиты снизу;
- нагрузка:  $g_k = 6,0$  кН/м<sup>2</sup> (включая нагрузки от изоляционных, выравнивающих и отделочных слоев);

$q_k = 3,0$  кН/м<sup>2</sup> (категория C,  $\psi_1 = 0,7$ );

$(G + q)_d = 12,6$  кН/м<sup>2</sup> (расчетная нагрузка);

$(G + q)_{d,fi} = 8,1$  кН/м<sup>2</sup> (нагрузка при пожаре);

• усилия:  $M_{Ed} = 39,4$  кНм (расчетное усилие);

$M_{Ed,fi} = 25,3$  кНм (усилие при пожаре).

Проверка

Проверка постоянной и временной расчетных ситуаций по предельным состояниям первой группы

- результаты подбора арматуры:  $A_{s, req} = A_{s, prev} = 5,24 \text{ см}^2$ .

Поперечное армирование не обязательно.

Проверка огнестойкости по табл. 5.8 EN [3].

Толщина плиты  $h_{s, prev} = 200 \text{ мм} > h_{s, req} = 100 \text{ мм}$ . Требования к огнестойкости обеспечено.

Расстояние до оси арматуры  $a_{prev} = 25 \text{ мм} < a_{req} = 30 \text{ мм}$ . Требования к огнестойкости не обеспечено.

Класс огнестойкости R90 не подтвержден табличными данными.

Проверка огнестойкости зональным методом по ДСТУ-Н EN 1992-1-2 [9,10]

- температура арматуры:  $\theta \approx 560^\circ\text{C}$  (для  $a = 25 \text{ мм}$ , рис. А.2 ДСТУ [9]);

- снижение прочности стали:  $k_s \approx 0,60$  (для  $\theta = 560^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon_{s, fi} \geq 2\%$  и кривая 1 для горячекатаной арматуры – рис. 4.2,а) [3];

- определение распределения напряжений: согласно ДСТУ [9] для классов бетона до C50/60 принимают следующие значения:  $\lambda = 0,8$ ,  $\eta = 1,0$ ,  $\epsilon_{cu3} = 0,35 \%$ ;

- усилия в арматуре:  $F_{sd, fi} = A_s \cdot k_s \cdot f_{yk} = 5,24 \cdot 0,60 \cdot 50 / 1,15 = 136,7 \text{ кН}$ ;

- эпюра напряжений:  $F_{cd, fi} = b \cdot \lambda \cdot x \cdot \eta \cdot f_{ck} = F_{sd, fi}$ ;

$\lambda \cdot x = 136,7 / (100 \cdot 2,0 / 1,5) = 1,025 \text{ см}$ ;

$x = 1,025 \text{ см} / 0,8 \approx 1,28 \text{ см}$ ;

$z = 20 - 2,5 - 1,025 / 2 = 17 \text{ см}$ ;

- определение деформаций:  $\epsilon_{s, fi} / (d - x) = \epsilon_{cu3} / x$

$\epsilon_{s, fi} = 0,35\% \cdot 16,22 \text{ см} / 1,28 \text{ см} = 4,43\%$ ;

- ограничение деформаций:  $2,0\% < \epsilon_{s, fi} = 5,8\% < \epsilon_{su, \theta} = 20\%$ .

Условия обеспечены.

- принятый момент:  $M_{Rd, fi} = F_{cd, fi} \cdot z = 136,7 \cdot 0,17 = 23,24 \text{ кНм}$

$M_{Rd, fi} = 23,24 \text{ кНм} < M_{Ed, fi} = 25,3 \text{ кНм}$ . Требования к огнестойкости не обеспечено.

Класс огнестойкости R90 не обеспечен.

Примечание 1. Если  $\epsilon_{s, fi} < 2,0\%$ , то применяют кривую 3 (рис. 4.2,а) [3].

Примечание 2. Поскольку сжатая зона не подвергается огневому воздействию, определять ширину поврежденной зоны  $a_z$  не нужно.

Примечание 3. Для обычных изгибаемых конструкций с минимальными размерами проверка на действие поперечной силы не требуется.

Расчетная схема усилий в сечении плиты приведена на рис. 2.

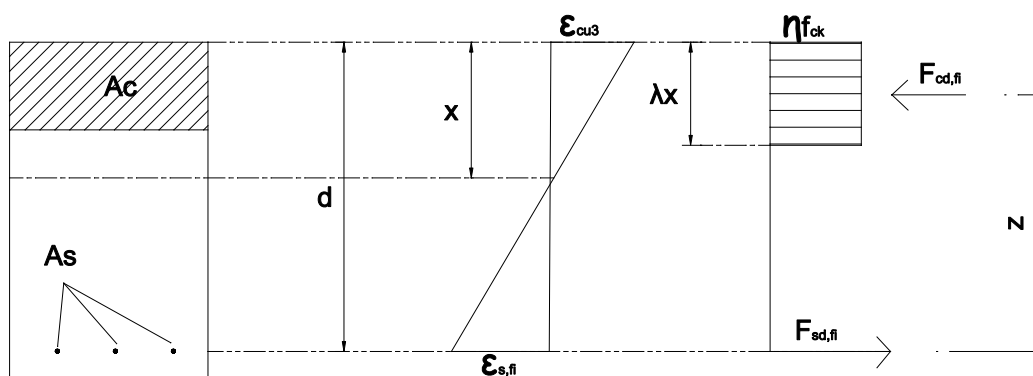


Рис. 2. Расчетная схема усилий в сечении плиты



**Расчет огнестойкости плиты уточненным методом.** Расчет проводится по признаку потери несущей способности (R) для второго варианта разработанного метода, основанного на использовании физически нелинейных пространственных

конечных элементов в программном комплексе ПК ЛИРА 9.6 R9 [6]. Расчетная схема плиты собрана из 625 физически нелинейных параллелепипедов КЭ231 размерами 0,2x0,2x0,04м и состоит из пяти слоев по толщине (рис. 3).

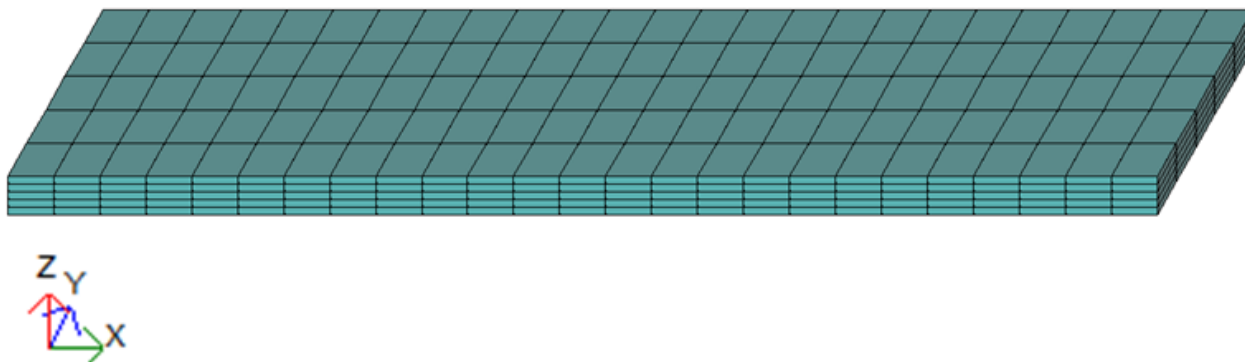


Рис. 3 Расчетная схема плиты

Задание связей. Для плиты на двух опорах отмечены нижние левые (№ 1, 7, 13, 19, 25, 31,) и нижние правые (№ 901, 907, 913, 919, 925, 931) узлы на торцах, на которые наложен запрет перемещений по оси Z и на узел №1 дополнительно запрет по осям X и Y.

Задание жесткостей. Отмечены все элементы второго снизу слоя, в котором размещена арматура, присвоен тип жесткости « 2<sup>x</sup>.3D», назначены значения  $\nu = 0,2$ ,  $R_0 = 0,025 \text{ МН/м}^3$  и параметры нелинейности бетона и арматуры.

Для основного материала (бетона) принят закон нелинейного деформирования 31 – экспоненциальный (рис. 4,а), для армирующего материала – закон нелинейного деформирования 11 – экспоненциальный (рис. 4,б). Параметры арматуры показаны на рис. 5.

Для остальных четырех слоев присвоен тип жесткости «3<sup>x</sup>.3D», назначены значения  $\nu = 0,2$ ,  $R_0 = 0,025 \text{ МН/м}^3$ , параметры нелинейности бетона и закон нелинейного деформирования 31 – экспоненциальный (рис. 4,а).



а



б

Рис. 4. Параметры нелинейного деформирования бетона и арматуры

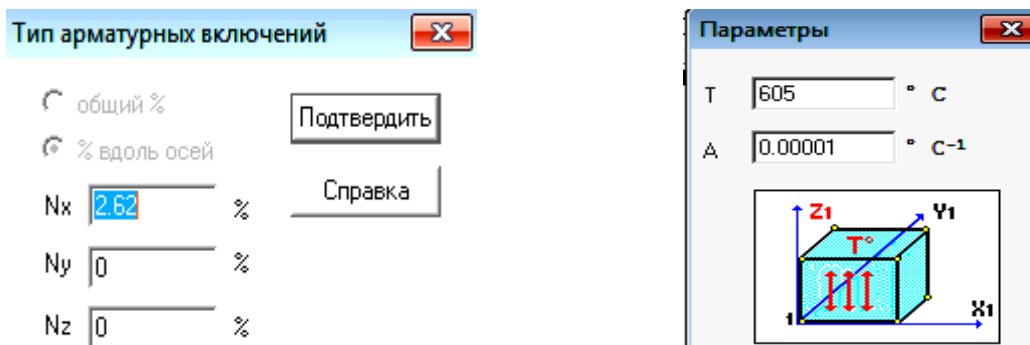


Рис. 5. Параметры арматуры и задание температуры

**Задание нагрузок.** Загружение 1 – собственный вес. Выделение всех элементов – добавление собственного веса.

Загружение 2 – нагружение во время пожара ( $G + q$ )  $d, fi = 8,1 \text{ кН / м}^2$  (см. исходные данные). Выделение всех элементов и узлов пятого (верхнего) слоя и на грань №6 задание нагрузки  $8,1 \text{ кН / м}^2$ .

Загружение 3 – температура. Поочередно выделяются слои, в каждый из которых назначаются температуры центров по высоте слоев, полученных по диаграммам распределения температуры в приложении А [3, 11] для заданного

нормативного предела огнестойкости 90 минут (R90). Для первого снизу слоя  $605 \text{ °C}$ , для второго  $260 \text{ °C}$ , для третьего  $105 \text{ °C}$ , для четвертого  $70 \text{ °C}$  и для пятого  $45 \text{ °C}$ . Направление по местной оси Z.

**Моделирование нелинейных нагружений.** В таблице моделирования нелинейных нагружений задается номер нагружения, метод расчета – простой шаговый, количество шагов (для первого нагружения 10, для второго и третьего – 50), минимальное число итераций 300, печать – перемещения и усилия после каждого шага (рис. 6).

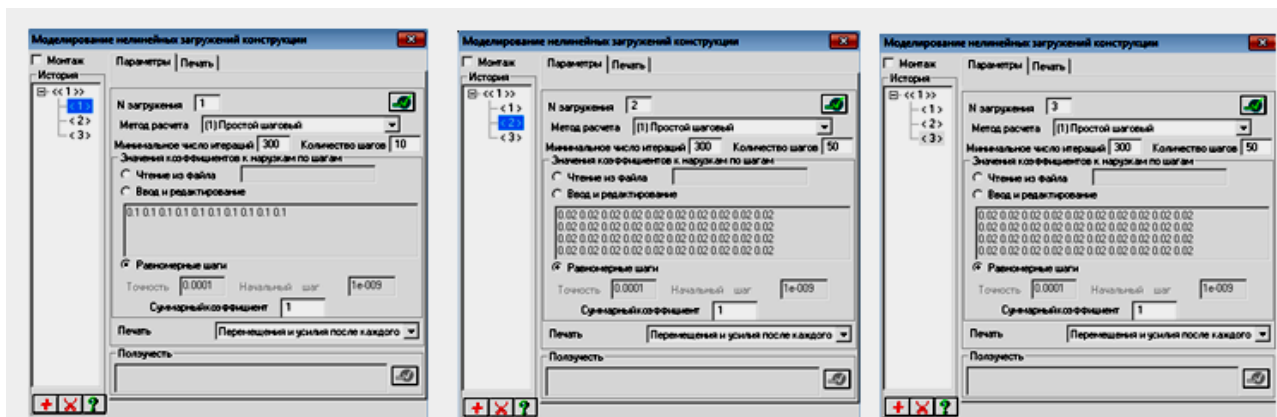


Рис. 6. Таблицы моделирования нелинейных нагружений плиты

**Результаты расчета.** Первые два локальных нагружения не привели к разрушению. Результаты моделирования для локального нагружения 3 выведены в скриншотах (картинах разрушения), показанных на рис. 7-10. На 15 шаге из 50

загружений появились разрушения в виде трещин (рис. 7), на 18 шаге к ним добавились разрушения от растяжения (рис. 8), на 42 шаге возникло разрушение от сжатия (рис. 9). Такая картина осталась до конца нагружений (рис. 10).



Рис. 7. Картина разрушения. Локальное загрузеие 3, шаг 15



Рис. 8. Картина разрушения. Локальное загрузеие 3, шаг 18



Рис. 9. Картина разрушения. Локальное загрузеие 3, шаг 42



Рис. 10. Картина разрушения. Локальное загрузеие 3, шаг 49

Распечатка таблицы состояния локального загрузеия 3 возникли только материалов показала, что до шага 11 трещины, за ними последовало 0,5 %

разрушения основного материала по 1-й главной площадке при растяжении. На 15 шаге процент разрушения составил 3,8 %, на 42 шаге зафиксировано 0,2 % разрушение от сжатия, 16,5 % по 1-й главной площадке при растяжении, 0,2 % по 1-й и 2-й главной площадке при растяжении. Остановки расчета не произошло, – на 50 шаге было 65,0 % основного материала с трещинами, 21,1 % разрушения по 1-й главной площадке, 1 % по 1-й и 2-й главной площадке, 1 % – по 3-й главной площадке при сжатии. Разрушение арматуры не зафиксировано.

Класс огнестойкости R90 обеспечен.

**Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.** Проведенные исследования показывают разную степень достоверности результатов расчета огнестойкости.

Наибольшей достоверностью обладает предложенный метод, основанный на использовании компьютерных технологий, нелинейных методов, базирующийся на основных принципах и допущениях теории теплопроводности, определенных принципах и допущениях строительной механики, учитывающий изменение механических свойств материалов от температуры.

### *Список использованных источников*

1. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі [Текст]: ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 (EN 1991-1-2:2002, IDT).
2. Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. General Rules and Rules for Buildings and Structural Fire Design. A.W. Beeby and R.S. Narayanan. 0 7277 3105 X. Published 2005.
3. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість [Текст] : ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 (EN 1992-1-2:2004, IDT).
4. Бартлеми, Б. Огнестойкость строительных конструкций [Текст] / Б. Бартлеми, Ж. Крюпа; пер. с франц. М. В. Предтеченского; под ред. В. В. Жукова. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
5. Fire resistance assessment of concrete structures / Fabienne ROBERT, Luc DAVENNE, Iuliana STOIAN // Workshop 'Structural Fire Design of Buildings according to the Eurocodes' – Brussels, 27-28 November 2012.
6. Фомин, С. Л. Методика расчета огнестойкости монолитных зданий с безригельными каркасами [Текст] / С. Л. Фомин // Міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. Вип.74: в 2-х кн.: Книга 1. – К.: ДП НДІБК, 2011. – С. 228-239.
7. Пожежна безпека об'єктів будівництва [Текст] : ДБН В.1.1-7-2002. – К.: Держбуд України, 2003.
8. Nachweis der Feuerwiderstandsdauer einer Hochbaudecke nach DIN EN 1992-1-2 [http://www.lga.de/lga/de/download/statik\\_tipp\\_1101.pdf](http://www.lga.de/lga/de/download/statik_tipp_1101.pdf)
9. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість [Текст] : ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 (EN 1992-1-2:2004, IDT).
10. Kodur, V.K.R., Agrawal, A. An approach for evaluating residual capacity of reinforced concrete beams exposed to fire Engineering Structures. 2016.
11. Fib Bulletin 46: Fire design of concrete structures – structural behavior and assessment, 2008.
12. Pakala, P., Kodur, V. Effect of concrete slab on the behavior of fire exposed subframe assemblies with bolted double angle connections . Engineering Structures. 2016.

13. Shakya, A.M., Kodur, V.K.R. Response of precast prestressed concrete hollowcore slabs under fire. Engineering Structures. 2015.

14. Kodur, V.K., Agrawal, A. Critical Factors Governing the Residual Response of Reinforced Concrete Beams Exposed to Fire. Fire Technology Article in Press. 2015.

---

Фомін Станіслав Леонідович, д-р техн. наук, професор кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-01-63. E-mail: Sfomin@ukr.net.

Плахотникова Ірина Анатоліївна канд. техн. наук, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-01-63. E-mail: ira5657@gmail.com.

Парафенко Ганна Олександрівна, студентка Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-01-63. E-mail: anna.parafenko@gmail.com.

Fomin Stanislav Leonidovich. Dr. Sc. , professor of concrete and masonry structures Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (057) 700-01-63. E-mail: Sfomin@ukr.net.

Plahotnikova Irina A. candidate. tehn. Associate Professor, Department of concrete and masonry structures of Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel. : (057) 700-01-63. E-mail: ira5657@gmail.com.

Parafenko Anna A. student of Kharkov National University of Construction and Architecture. Tel.: (057) 700-01-63. E-mail: anna.parafenko@gmail.com.

Стаття прийнята 23.05.2016 р.

**УДК 691.58.688.3**

### **РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДСОРБЦИИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТА**

**Канд. техн. наук С. М. Золотов, аспиранты П. М. Фирсов, К. А. Клиценко (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова)**

### **РЕОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ АДСОРБЦІЇ МОДИФІКОВАНИХ НАПОВНЮВАЧІВ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТА**

**Канд. техн. наук С. М. Золотов, аспиранты П. М. Фірсів, К. О. Кліценко (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова)**

### **RHEOLOGICAL RESEARCH AND METHYL METHACRYLATE MODIFIED FILLERS ADSORPTION DETERMINATION**

**PhD Engineering, associate professor Sergiy Zolotov, post-graduate student Pavlo Firsov, Kseniya Klicenko**

*Проведена сравнительная характеристика различных модификаторов с целью возможного повышения адгезионной связи поверхности песка с полимером. В ходе исследований было определено, что повышение прочности материала возможно путем химической обработки наполнителя. В результате изучения вязкости композиционной системы в течение процесса полимеризации с наполнителем показано, что песок не является отстраненной частью, а непосредственно участвует в формировании структуры*

материала. Результаты данных экспериментальных исследований могут быть использованы для последующего улучшения составов полимерных клеевых материалов, широко используемых в промышленном и гражданском строительстве.

**Ключевые слова:** полимеризация метилметакрилата, вязкость, концентрация наполнителя, адсорбция, прочность, модифицирующие добавки.

Проведена порівняльна характеристика різних модифікаторів з метою можливого підвищення адгезійного зв'язку поверхні піску з полімером. В ході досліджень було визначено, що підвищення міцності матеріалу можливо шляхом хімічної обробки наповнювача. В результаті вивчення в'язкості композиційної системи в перебігу процесу полімеризації з наповнювачем показано, що пісок не є відстороненою частиною, а безпосередньо бере участь у формуванні структури матеріалу. Результати даних експериментальних досліджень можуть бути використані для подальшого удосконалення складу полімерних клейових матеріалів, які широко використовуються в промисловому та цивільному будівництві.

**Ключові слова:** полімеризація метилметакрилату, в'язкість, концентрація наповнювача, адсорбція, міцність, модифікуючі добавки.

*The central issue of the paper is the viscosity dependence determining from the number of various factors and advanced modifiers selection for further elements constructions and adhesive bonding development. Various modifiers comparative characteristic, to achieve the possibility to increase adhesive bonding parameters at the surface of the sand with a polymer, is given. This research proved that increasing of the polymer material strength characteristics is possible by the way of the filler chemical treatment. The composite system viscosity analysis, at the same time with the polymerization process with the filler, shown that the sand isn't a self-independent part and he is directly involved in the material structure formation. The experimental research results can be used for further polymer adhesive materials, widely applied in industrial and civil engineering, improvement. On the basis of the research results the structural materials durability and heat resistance parameters dependence, mainly from the polymer and filler bonding strength, was determined.*

**Keywords:** methyl methacrylate polymerization, viscosity, filler concentration, adsorption, strength, modifying additives.

**Вступление.** Перспективным материалом для изготовления конструкционных элементов является клеевой материал на основе полиметилметакрилата (ПММА) [1-4]. Сочетание ПММА с песком и различными пигментами дает композицию, которая может успешно конкурировать с традиционными строительными материалами. Данные композиции являются весьма важной группой конструкционных соединений благодаря их быстрому отверждению и высокой прочности. По сравнению с эпоксидными и полиуретановыми составами они

отверждаются менее чем за 24 часа при температуре окружающей среды выше 0°C [4]. Такая способность к быстрому отверждению обеспечивает им значительное преимущество при использовании в отсутствии возможности предоставить все необходимые благоприятные технологические условия.

Свойства твердых полимерных материалов в большей степени зависят от условий и способа полимеризации исходного мономера. Полимерные молекулы содержат большое число атомов и атомных группировок, конфигурации

которых играют важную роль в построении надмолекулярной структуры полимера.

Кроме того, на надмолекулярную структуру полимера оказывают влияние внутри- и межмолекулярные связи, обуславливающие многообразие пространственных конформаций макромолекулярной цепочки.

Технические полимеры не имеют высокой степени стереорегулярности и полностью спиральной структуры. Макромолекулы полимеров могут иметь различную длину, однако при этом возможно перехлестывание цепей и образование складок. Все это сказывается на упорядоченности полимера.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Результаты экспериментов по определению прочности безанкерного крепления технологического оборудования в случае приклейки стальных пластин к поверхности бетона модифицированными акриловыми клеями на основе ПММА приведены в научных работах Золотова С. М., Фирсова П. М., Еремеевой Т. Г. [5,6]. В данных статьях проработаны теоретико-методологические и методические подходы по определению прочностных характеристик модифицированных акриловых композиций в зависимости от типа существующего или планируемого крепежного узла.

Проблематика влияния наполнителя на реологические свойства композиционных материалов была исследована в ряде работ Золотова М. С., Бабаева В. Н., Шутенко Л. Н., Золотова С. М. [7,8]. В результате данных исследований было экспериментально получено значение начальной вязкости акрилового компаунда, а также значения оптимальной и максимальной вязкости, приемлемой для наполнителя компаунда кварцевым песком. Показано, что вязкость состава зависит от температуры окружающей среды, однако ее можно регулировать количественным составом компаунда.

Иностранные ученые Martinez M., Abenojar J., Pantoja M., [9,10,11] Yanmei Wang [12] детально исследовали влияние влажности и температуры на механические свойства модифицированных составов акриловых и эпоксидных композиций, а также их полимеризацию с различными гидроксилламидами в структуре.

Исходя из этого, в данный момент представляет интерес провести измерение вязкости дисперсной системы в процессе полимеризации дисперсионной среды составов ПММА, а также продолжить изучение физико-химических параметров данного композиционного материала.

**Определение целей и основных задач исследования.** Важное значение имеют исследования, направленные на повышение прочности и термостойкости конструкционных материалов. Данные параметры зависят в большей степени от прочности сцепления полимера с наполнителем.

ИК-спектроскопия полимерных материалов наряду с другими физическими методами изучения структуры молекул является наиболее распространенным методом исследования высокомолекулярных соединений [13,14].

Особое значение приобрела ИК-спектроскопия для исследования кинетики полимеризации, деструкции полимерных материалов, а также механизма стереорегулярной полимеризации. Цепные молекулы могут быть охарактеризованы одномерными пространственными группировками. Взаимодействия между элементарными звеньями вдоль цепи обычно значительно превосходят межмолекулярные взаимодействия.

Измерение вязкости дисперсной системы в процессе полимеризации дисперсионной среды также может предоставить ценную информацию об образовании и формировании структуры композиционного материала.

Основной целью данного исследования является детальное изучение

физических и физико-химических параметров композиционного материала на основе ПММА с применением различных модификаторов.

**Основная часть исследования.**

Представляет практический интерес выяснить влияние значительного количества песка, взятого в качестве наполнителя, на структурообразование в процессе полимеризации метилметакрилата (ММА) в присутствии ПММА. Концентрация ПММА в растворе, в котором растворителем является ММА, растет со временем в результате полимеризации ММА. Поэтому межмолекулярное взаимодействие, а следовательно, и вязкость системы должны сильно возрастать. Если между

макромолекулами и наполнителем имеет место взаимодействие хотя бы физического или физико-химического уровня, то наполнитель можно рассматривать как сополимер, активно участвующий в структурообразовании. Реологические свойства системы, в том числе и вязкость, также являются одним из показателей процессов полимеризации и структурообразования.

Измерения вязкости проводились на ротационном вискозиметре подгруппного типа марки "ВА.1" с воспринимающими элементами типа "цилиндр-цилиндр" (рис. 1). Вискозиметр обеспечивает автоматическую обработку результатов измерения вязкости с цифровой индикацией измеряемой величины.

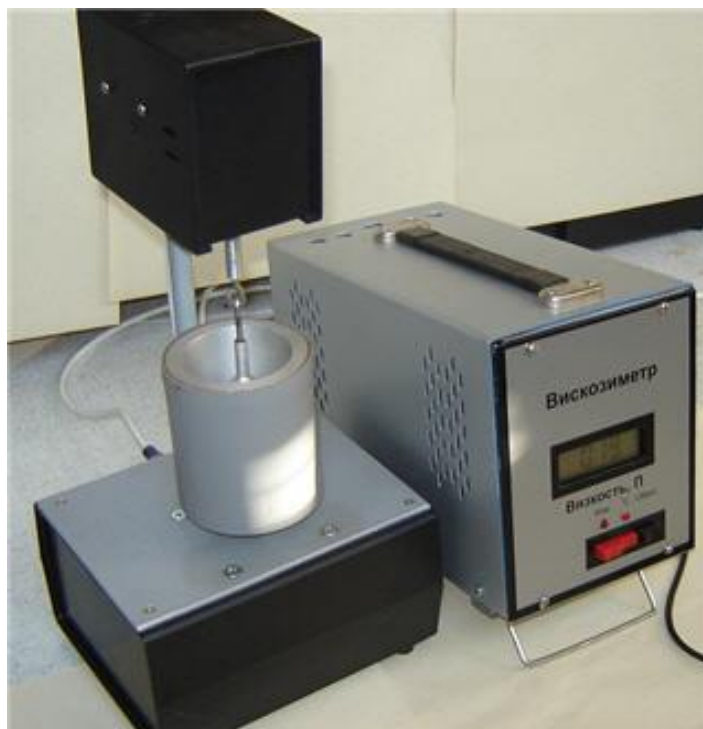


Рис. 1. Рабочая установка ротационного вискозиметра марки ВА.1

Во внешний цилиндр воспринимающего элемента заливали 9,55 мл полимеризующейся смеси с добавками наполнителя или без них и через

определенные промежутки времени снимали показания вязкости.

Данные измерения вязкости представлены в табл. 1 и на рис. 2, 3, 4.



Таблиця 1

Зависимость вязкости композиции от времени полимеризации

№ п/п	Состав композиционного материала	Время полимеризации, мин	Вязкость, Па х с
1	2	3	4
1	10 г ПММА + 10 г ММА	10	0,7
		15	1,0
		20	2,0
		25	4,0
		30	7,3
		35	22,4
		40	66,3
		45	124,1
		50	242,3
2	10 г ПММА + 10 г ММА + 5 г (20% SiO <sub>2</sub> )	10	3,8
		15	4,2
		20	8,9
		25	11,6
		30	19,7
		35	43,2
		40	112,4
		45	193,2
		50	579,8
3	10 г ПММА + 10 г ММА + 7,5 г (27,3% SiO <sub>2</sub> )	10	4,0
		15	5,1
		20	11,2
		25	20,1
		30	51,3
		35	128,4
		40	254,2
		45	737,0
		4	10 г ПММА + 10 г ММА + 10 г (33,3 SiO <sub>2</sub> )
15	7,2		
20	12,4		
25	37,0		
30	97,0		
35	231,4		
40	478,6		
45	997,6		

На рис. 2 представлена зависимость  $\eta$  от  $t$  композиционных материалов, содержащих 0; 20; 27,3 и 33,3% песка (кривая соответственно 0; 1; 2 и 3). Видно,

что влияние наполнителя начинает значительно проявляться по мере увеличения концентрации ПММА в процессе полимеризации. Следовательно,

песок снижает подвижность макромолекулы ПММА и отдельных участков цепи, что способствует межмолекулярному взаимодействию, а значит, и структурообразованию.

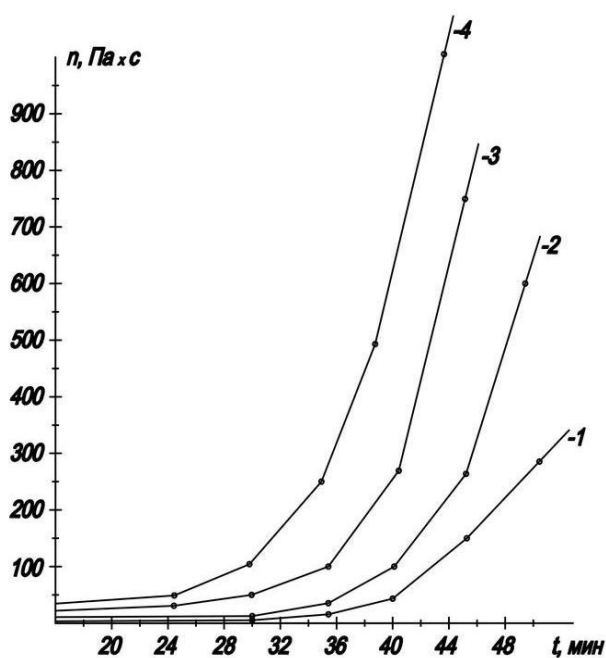


Рис. 2. Зависимость вязкости состава от времени полимеризации композиционных материалов с различной концентрацией песка

На рис. 3 и 4 показаны зависимости удельной вязкости от времени и весовой концентрации песка.

На рис. 3 кривые 1, 2, 3 показывают изменения  $\eta_{уд}$  в зависимости от концентрации песка соответственно через 30, 35 и 40 мин после начала полимеризации.

Кривые 1, 2, 3 на рис. 4 – это изменение  $\eta_{уд}$  со временем для 20; 27,3 и 33,3 % содержания песка в системе. Снижение  $\eta_{уд}$  со временем при данной концентрации песка (рис. 4) свидетельствует о том, что вязкость композиционного материала растет

Как показано в предыдущих исследованиях [4,8], мономер адсорбируется на песке, а следовательно, в процессе полимеризации песок может включаться в качестве сополимера в макромолекуле, еще более упрочняя структуру.

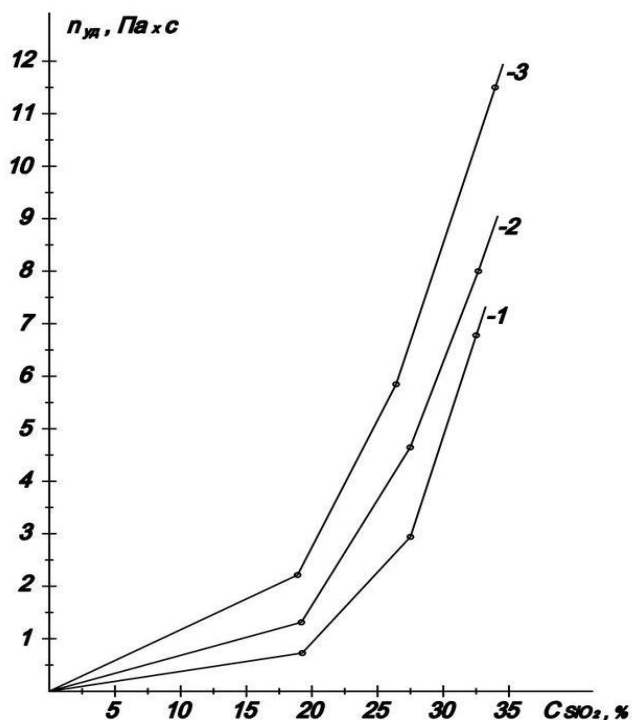


Рис. 3. Изменение удельной вязкости в зависимости от концентрации песка в структуре состава

главным образом за счет увеличения концентрации ПММА в процессе полимеризации. Рост  $\eta_{уд}$  в интервале от 40 до 45 мин после начала полимеризации можно объяснить началом сополимеризации, т.е. включением частиц наполнителя в макроцепи.

Таким образом, изучение вязкости композиционной системы в течение процесса полимеризации и в присутствии наполнителя показывает, что песок не является индифферентной частью системы, а участвует в формировании структуры материала.

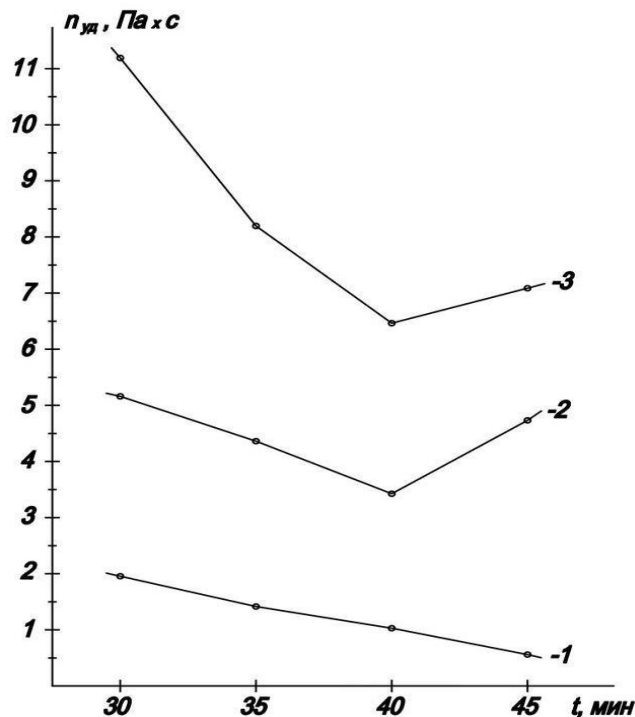


Рис. 4. Изменение удельной вязкости состава в зависимости от времени полимеризации

Как было показано в предыдущих исследованиях, полиметилметакрилат [4,8,10,17] практически не адсорбируется на песке, адсорбция же метилметакрилата (ММА) в сильной степени определяется состоянием поверхности песка и в первую очередь ее химической модификацией. В связи с этим представляло интерес продолжить поиски модификаторов с целью повышения адсорбционной способности поверхности песка и, следовательно, адгезионной связи с ней полимера. Известно, что адсорбция на поверхности твердых тел происходит под действием различных видов межмолекулярных и химических взаимодействий – от слабых вандерваальсовых до донорно-акцепторных связей с последующим образованием ковалентных связей [12,15].

На поверхности оксидов в процессе их приготовления или хемосорбции молекул воды образуются поверхностные гидроксильные группы, которые определяют в значительной степени

адсорбционные свойства оксидов. Характерной особенностью этих групп является высокая термическая стабильность (удаляется после обработки в вакууме при температурах выше 700-800 °С). Кроме того, на поверхности оксидов существуют близкорасположенные и достаточно благоприятно ориентированные для образования между ними водородной связи – связанные гидроксильные группы.

При физической адсорбции молекулы взаимодействуют с поверхностью за счет вандерваальсовых сил и образования водородной связи, сохраняя при этом свою индивидуальность.

Однако часто физическая адсорбция сопровождается хемосорбцией и поверхностными реакциями. Тип взаимодействия определяется особенностями строения и свойств поверхностных химических соединений и взаимодействующих с ними молекул.

Для исследования поверхностных явлений широко используют колебатель-

ную спектроскопию. Большое значение имеют исследования с помощью спектральных методов реакций химического модифицирования наполнителей полимеров.

Спектральные проявления физической адсорбции молекул аналогичны спектральным проявлениям в объемной фазе – в кристаллах, жидкостях и растворах.

Наиболее отчетливые проявления физической адсорбции наблюдаются при взаимодействии с поверхностью симметричных молекул и молекул с легко поляризуемыми связями (молекулы ароматические и с сопряженными связями). В этом случае наблюдается сильное увеличение интенсивности некоторых полос поглощения и даже появление новых полос.

В спектрах соединений с двойными связями может наблюдаться и ослабление интенсивности полос поглощения колебаний  $-CH=CH-$  при адсорбции кремнеземом ненасыщенных кислот из раствора в тетрахлориде углерода, что указывает на параллельную ориентацию углеводородных цепей молекул. В спектрах

карбонилсодержащих полимерных молекул наблюдается изменение интенсивности поглощения валентных колебаний группы  $-C=O$  макромолекул в результате адсорбции на кремнеземе.

В последние годы важное значение приобрели наполнители с заданными свойствами поверхности адсорбента. Например, изменение адсорбционных свойств кремнезема достигается путем поверхностных реакций модифицирования, для получения однородной, неспецифической поверхности адсорбента, обработкой металлами, алкоксисиланами и др.

Адгезионные способности полиметилметакрилата (ПММА) к песку и бетону многие исследователи связывают с хорошей адсорбционной способностью полимера на частичках оксида кремния и соединениях кальция.

Для получения блок-полимеров такая смесь выливается в форму и оставляется на воздухе до затвердевания (рис. 5, 6). В процессе полимеризации ПММА может одновременно протекать и адсорбция на песке любого из присутствующих компонентов.



Рис. 5. Нанесение растворной смеси ПММА на поверхность бетонного образца марки С16/20 в лаборатории кафедры строительных конструкций ХНУГХ имени А.Н. Бекетова



Рис. 6. Заливка образцов растворной смеси ММА в металлическую опалубочную форму в лаборатории кафедры строительных конструкций ХНУГХ имени А.Н. Бекетова

Благодаря исследованиям и разработкам лаборатории Харьковского национального университета городского хозяйства имени А.Н. Бекетова в данный момент составы ПММА широко используются при изготовлении конструкционных материалов, а также при проведении работ по монтажу и установке на возводимых и существующих фундаментах и покрытиях оборудования, технологических линий и других вспомогательных устройств. Начальная стадия технологического процесса приготовления композиционного материала заключается в приготовлении

смеси, состоящей из раствора полиметилметакрилата в метилметакрилате (мономер) в соотношении 1:1, наполнителя (песок) и иницилируемой добавки.

В связи с этим рассмотрим адсорбцию ММА на песке и влияние модификации песка на его адсорбционные свойства.

Для изучения процесса адсорбции на песке мономера использовали метод спектроскопии в ультрафиолетовой области. Спектры снимались на инфракрасном спектрофотометре марки SPECORD M80 (рис. 7). В качестве универсального растворителя использовался бензол.



Рис. 7. Рабочая установка спектрофотометра SPECORD M80 и снятие показаний ультрафиолетовых спектров поглощения ММА

Для количественного расчета адсорбции были сняты ультрафиолетовые спектры поглощения ММА в бензоле следующих концентраций: 0,01; 0,025; 0,05; 0,075 и 0,1 %. Максимум полосы поглощения 305 нм, которую связывают с группой  $-C=O$ , зависит от концентрации и оптическая плотность его взята за

количественное определение ММА в растворе. На рис. 8 приведены спектры поглощения ММА в растворе различных концентраций, а на рис. 9 показана калибровочная кривая, связывающая оптическую плотность максимума при 305 нм с концентрацией ММА в растворе.

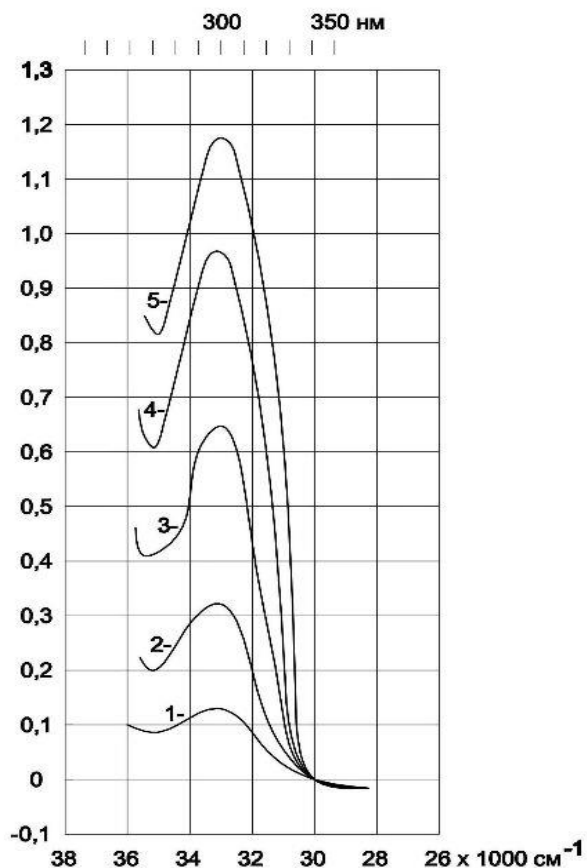


Рис. 8. Спектры поглощения метилметакрилата (ММА) в бензольном растворе

Методика изучения адсорбции, отработанная в предыдущих исследованиях [1,7,8,16], заключалась в следующем: 5 г песка засыпали в стеклянную трубку диаметром 0,6 см и высотой 20 см, 0,1 % раствор ММА в бензоле пропускали через полученную адсорбционную колонку и

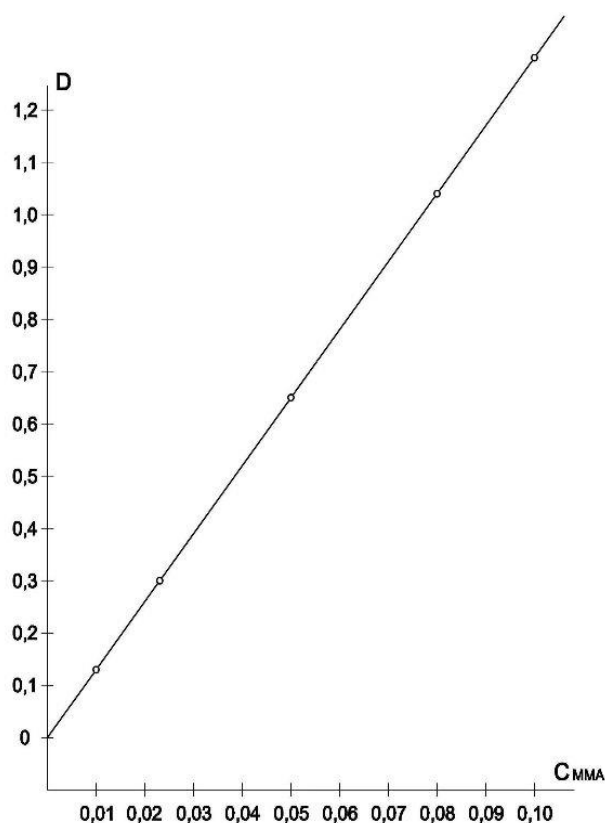


Рис. 9. Калибровочная кривая, указывающая взаимосвязь оптической плотности максимума при 305 нм с концентрацией ММА в растворе

отбирали первые 5 мл для спектроскопического исследования. Снижение концентрации ММА при прохождении через адсорбент свидетельствует о протекании адсорбции. Исследования показали, что если песок не модифицирован химическими веществами,

то при 305 нм не только не снижается, но и увеличивается. Причем наиболее заметно это наблюдается у неочищенного песка (рис. 8, кривая 3) и в меньшей степени, но все же заметно у песка, промытого горячей водой (рис. 8, кривая 2). Кривая 1 на рис. 8 показывает спектр 0,1 % раствора ММА. Песок, особенно примесь коллоидных частиц, катализирует реакцию взаимодействия бензола с ММА, в результате чего образуется более гидрофобное вещество, обладающее меньшей способностью к адсорбции. Образование его происходит, по-видимому, за счет молекулярных сил, повышающих оптическую активность связи  $-C=O$ . При промывании песка удаляется высокодисперсная составляющая его часть, которая снижает данный процесс.

Процесс модифицирования проводился следующим образом. Песок промывали декантацией горячей дистиллированной водой и помещали на сутки в 10%-ный раствор соли. Затем песок тщательно промывали водой, высушивали при 120°C, охлаждали, засыпали в

стеклянную трубку и исследовали адсорбцию ММА из бензольного раствора.

На рис. 8 в том числе приведены спектры поглощения первых 5 мл 0,1% раствора ММА в бензоле, пропущенного через колонку. Кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно относятся к 0,1 % раствора ММА до адсорбции и пропущенного через песок, модифицированный растворами.

Адсорбция рассчитывалась по формуле

$$A = (C_n - C_f) \times 100,12,$$

где  $C_n = 0,1$  – концентрация раствора до адсорбции, которой соответствует оптическая плотность при 305 нм;

$C_f$  – концентрация раствора после адсорбции, найденная по калибровочной кривой, которой также соответствует плотность раствора при 305 нм;

$M$  – молекулярная масса метилметакрилата,  $M = 100,12$  г/м.

Результаты расчета адсорбции сведены в табличной форме (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета адсорбции метилметакрилата (ММА)

№ п/п	Модифицирующий раствор	$C_f$	$\Gamma$ , м/г $\times 10^6$
1	NaCl	0,10	0
2	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,095	0,5
3	KMnO <sub>4</sub>	0,089	1,1
4	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	0,075	2,5
5	(NaH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> MnO <sub>4</sub>	0,052	4,8

**Выводы и дальнейшие перспективы развития в данном направлении.** Механические свойства клеевых материалов в сильной степени определяются адгезией полимера к поверхности наполнителя. Изучение адсорбции ММА поверхностью модифицированного песка показывает

возможность повышения прочности материала путем химической обработки наполнителя.

Изучение процесса вязкости композиционной системы в течение процесса полимеризации и в присутствии наполнителя показывает, что песок не является индифферентной частью системы,

а непосредственно участвует в формировании структуры материала.

Влияние наполнителя на структурообразование композиционного материала исследовано по изменению

вязкости системы в процессе полимеризации метилметакрилата.

Результаты данных исследований могут быть, в дальнейшем, использованы для существенного улучшения составов клеевых материалов.

### *Список использованных источников*

1. Золотов, С. М. Акриловые клеи для соединения строительных конструкций [Текст]: монография / С. М. Золотов. – Харьков: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2016. – 185 с.

2. Шутенко, Л. М. Кріплення технологічного обладнання і металевих конструкцій до фундаментів та безпека праці [Текст] : монографія // Л. М. Шутенко, М. С. Золотов, Я. О. Серіков, В. О. Складаров. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2008. – 285 с.

3. Фирсов, П. М. Расчетная модель клеевого соединения сталь-бетон [Текст] / П. М. Фирсов // Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства: IV междунар. науч.-техн. интернет-конф.; матер. конф. – Харьков: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2014. – С. 56-61.

4. Золотов, С. М. Полимерные связующие, наполнители и модифицирующие добавки акриловых клеев повышенной адгезионной и когезионной прочности [Текст] / С.М. Золотов, Е. С. Скрипник, М. С. Золотов // Комунальне господарство міст. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2013. – Вип. 110. – С. 8-16.

5. Золотов, С. М. Адгезионная прочность безанкерного соединения сталь-бетон на модифицированных акриловых клеях при равномерном и неравномерном отрыве [Текст] / С. М. Золотов, П. М. Фирсов // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2015. – Вип. 4 (82). – С. 102-106.

6. Золотов, М. С. Влияние конструктивных факторов крепежного узла на прочность клеевого соединения безанкерного крепления [Текст] / М. С. Золотов, П. М. Фирсов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 2015. – Вип. 30. – С. 127-134.

7. Золотов, С. М. Влияние различных факторов на вязкость акрилового компаунда [Текст] / С.М. Золотов, О.Ю. Супрун, А.Х. Дауд // Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства: матеріали IV міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – С. 42-44.

8. Золотов, С.М. Влияние различных факторов на жизнеспособность акриловых клеев [Текст] / С. М. Золотов, О. Ю. Супрун, А. Х. Дауд та ін. // Комунальне господарство міст. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – Вип. 116. – С. 60-63.

9. Abenojar J., Martínez M.A., Velasco F., del Real-Romero J.C. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of an epoxy reinforced with boron carbide / J. Abenojar, M.A. Martínez, F. Velasco, J.C. del Real-Romero // Journal of Adhesion Science and Technology. 25 (18), 2445-2460, (Aug/2011).

10. Chamochín R., Cano M., Abenojar J., Pantoja M., Ballesteros Y., del Real-Romero J.C. The effect of surface treatment on the behavior of toughened acrylic adhesive/GRP(epoxy) composite joints / R. Chamochín, M. Cano, J. Abenojar, M. Pantoja, Y. Ballesteros, J.C. del Real-Romero // Journal of Adhesion Science and Technology. 24 (11-12), 1903-1916, (Aug/2010).

11. del Real-Romero J.C., Cano M., Abenojar J., Martínez M.A. Adhesive bonding of aluminium with structural acrylic adhesives: durability in wet environments / J.C. del Real-Romero,



M. Cano, J. Abenojar, M.A. Martínez // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 20 (16), 1801-1818, (Dec/2006).

12. Yanmei Wang, Mika Kimura, Atsushi Sudo, Takeshi Endo. Polymerization of epoxide with hydroxylamides as thermally latent initiators / Yanmei Wang // *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry*. 1 June 2016. – Vol. 54. – Issue 11.

13. Заикин, В.Г. Основы масс-спектрометрии органических соединений [Текст] / В. Г. Заикин, А. В. Варламов, А. И. Микая и др. – М.: МАЙК “Наука/Интерпериодика”, 2001. – 286 с.

14. Заикин, В.Г. Масс-спектрометрия синтетических полимеров [Текст]: монография / В. Г. Заикин. – М.: ВМСО, 2009. – 332 с.

15. Аверко-Антонович, И. Ю. Методы исследования свойств полимеров [Текст]: учеб. пособие / И. Ю. Аверко-Антонович, Р. Т. Бикмуллин. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2002. – 604 с.

16. Strobel M. Contact angle measurements on oxidized polymer surfaces containing water-soluble species / Mark Strobel, Seth M. Kirk, Luke Heinzen, Eric Mischke, Christopher S. Lyons, Jim Endle, Derrick Poirier & Giles Dillingham // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 29 (14), 1483-1502, (Apr/2015).

17. Xin Fan, Lin Niu. Performance of redispersible polymer powders in wall coatings / Xin Fan, Lin Niu // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 29 (4), 296-307, (Dec/2014).

Рецензент д-р техн. наук, профессор В.П. Шпачук

---

Золотов Сергій Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова. Тел.: +380505511734. E-mail: zolotov.s.m@mail.ru.

Фірсов Павло Михайлович, аспірант кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова. Тел.: +380950020626. E-mail: firsov1991@mail.ua

Кліценко Ксенія Олександрівна, аспірант кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел.: +380639516347. E-mail: bartzagova.kseniia@mail.ru

Zolotov Sergiy, PhD Engineering, Associate Professor, Building Structures Department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: +380505511734. E-mail: zolotov.s.m@mail.ru.

Firsov Pavlo, post-graduate student, Theoretical and Structural Mechanics Department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: +380950020626. E-mail: firsov1991@mail.ua.

Klicenko Kseniya, post-graduate student, Theoretical and Structural Mechanics Department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: +380639516347.

E-mail: bartzagova.kseniia@mail.ru.

Стаття прийнята 25.05.2016 р.



**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО  
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTED SCIENTIFIC WORKS OF UKRAINIAN  
STATE UNIVERSITY OF RAILWAY**

**Випуск 161**

«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

Відповідальний за випуск Янченко Л.В.

Редактори Буранова Н.В., Еткало О.О., Решетилова В.В.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 24.05.2016 р.

Формат паперу А4. Папір писальний.

Умовн.друк. арк. 13,5. Тираж 105. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.