



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 189

Харків 2020

УДК 656.2(062)

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

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

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті:
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe.

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

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

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

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

Реферативна база

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

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 2 від 13 лютого 2020 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Редакційна колегія

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

Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

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

Будівництво та цивільна інженерія (192)

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

Механічна інженерія (131, 132, 133)

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

Транспортні технології (275)

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

Геодезія та землеустрій (193)

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

Теплоенергетика (144)

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

ЗМІСТ

Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Варваров В. В.* Про фізичний сенс коефіцієнта тертя в умовах аномально низького тертя і зношування 6

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Кривенко П. В., Петропавловський О. М., Руденко І. І., Константиновський О. П.* Регулювання власних деформацій шлаколузких дрібнозернистих бетонів комплексними багатофункціональними добавками для попередження корозії сталеві арматури 13
- Менейлюк О. І., Менейлюк І. О., Нікіфоров О. Л., Свердленко О. Л.* Оптимізація тривалості реконструкції громадської будівлі за фінансових і організаційних обмежень 20
- Воскобійник О. П., Мозговий А. О.* Імовірнісне оцінювання надійності пасивних анкерів 27
- Шмуклер В. С., Лугченко О. І., Нажем А. Х.* Чисельна верифікація одного підходу біонічної раціоналізації конструкцій 36

Геодезія та землеустрій (193)

- Саяпін О. С., Орел Є. Ф., Камчатна С. М., Ужвієва О. М.* Геодезичний контроль планового положення залізничних кривих 52

Транспортні технології (275)

- Бантюкова Н. С., Прохорченко А. В., Білокудря В. В., Журба О. О.* Удосконалення технології перевезень вагонних і групових відправок на основі бронювання місць у вантажних поїздах 60
- Огар О. М., Куценко М. Ю., Верховод М. М., Старинцева Ю. С.* Розроблення процедури розрахунку витрат дизельного палива і часу на виконання маневрового напіврейсу на безгіркових сортувальних пристроях 69

УДК 621.891

ПРО ФІЗИЧНИЙ СЕНС КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ В УМОВАХ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ І ЗНОШУВАННЯ

В. В. Варваров

ON THE PHYSICAL MEANING OF THE COEFFICIENT OF FRICTION UNDER CONDITIONS OF ABNORMALLY LOW FRICTION AND WEAR

V. V. Varvarov

***Анотація.** Наведено теоретичні дослідження трибосистем, що працюють в умовах аномально низького тертя і зношування. На основі аналізу механізмів дисипації зовнішньої енергії, як факторів зниження тертя в різних галузях природи, уточнено роль хвильової складової сили тертя. За певних термодинамічних умов у трибосистемі формується досить значна хвильова складова сили тертя, що істотно зменшує молекулярно-механічну.*

***Ключові слова:** аномально низьке тертя, коефіцієнт тертя, трибосистема, хвильова складова тертя.*

***Abstract.** The theoretical studies of tribosystems (TS) operating under conditions of abnormally low friction and wear are given. On the basis of the analysis of the mechanisms of dissipation of external energy, as factors of friction reduction in different areas of nature, the role of the wave component of friction force is clarified. Under certain thermodynamic conditions, a sufficiently large wave component of the friction force is formed in the TS, which significantly reduces the molecular-mechanical. The wave component F_w of the friction force F_f is the «entropy pump» that converts the non-compensated external friction into the internal friction and accumulates the internal energy in the elastic-plastic layer of the rheological model of Shvedov tribosystem construction. The physical meaning of the friction coefficient for TS operating under conditions of normal mechanochemical wear and abnormally low friction and wear has been determined. It is determined that the main cause of the tribosystems transition to abnormally low friction and wear is the rheological properties of the tribosystem surface layer. In an anomalous-low friction and wear mode tribosystem, an equilibrium and inverse change of some insignificant amount of energy without work is possible. TS heat dissipation in this case approaches zero. When the external friction conditions change, the degree of excitation of tribosystem n , which depends on the number of mechanical quanta, changes. Any change in the tribosystem that puts it off balance, according to Le Chatelier principle, initiates in it processes that try to return it to its original position. For these processes in the developed model is responsible module of canonical energy distribution, which is regulated by microgeometry of the surface layer of TS. It is established that the condition of achieving abnormally low friction and wear is the equality of robots that perform external and internal forces in terms of contact interaction. Structural-energy approach to contact interaction allowed to establish the physical meaning of the coefficient of friction, which generally characterizes the work of external and internal forces in the path of friction tribosystems.*

***Keywords:** abnormally low friction, friction coefficient, tribosystem, wave component friction.*

Вступ. Проблеми зниження сили тертя і зношування при взаємному переміщенні твердих тіл з'явилися і вирішувалися в природі задовго до появи людини.

Сучасна теоретична та експериментальна трибологія все частіше звертається до пояснення природних феноменів зниження сили тертя. Так, аналіз публікацій, присвячених дослідженню високошвидкісного руху у воді дельфінів, акул, ластоногих, свідчить, що зменшення сили тертя в кожному з цих випадків відбувається створенням різними способами пружних хвиль. Цей природний феномен зниження сили тертя відомий як парадокс Грея.

У техніці Н. Тесла одним з перших звернув увагу на роль хвильової складової контактної взаємодії при русі твердих тіл. Цей ефект використаний при розробленні дискового роторно-турбінного двигуна, у якому замість звичайних лопаток-лопатець, що рухаються з кутом атаки до потоку, використовуються пружні диски, що рухаються вздовж потоку. При цьому вони приводяться в рух завдяки тяжінню особливого роду, що виникає між поверхнею диска і рухомим газом або рідиною. Це тяжіння, будучи гальмуючим фактором для літальних та інших рухових апаратів, за словами Н. Тесли, викликане «поштовхом рідини об шорстку поверхню твердої речовини».

Фактично цей «поштовх» являє собою хвильову частину сили зовнішнього тертя. Отже, визначення природи цієї складової є актуальною проблемою, а фізичний сенс коефіцієнта тертя в цьому питанні стає визначальним фактором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. А. І. Вейник у своїй роботі 1973 року висунув припущення, що «квазіпружна взаємодія може бути антидисипативним фактором, який призводить до виведення накопиченої внутрішньої енергії з трибосистеми» (ТС) [1]. Його гіпотеза базувалася на принципах нерівноважної термодинаміки.

Між цих антидисипативних факторів головний внесок припадає на кінетичну (хвильову) складову сили тертя, що формується при різниці швидкостей гальмування при молекулярно-механічній взаємодії і проковзуванні при їх розгоні [1].

Фізична модель аномально низького тертя і зношування (АНТЗ) складалася на основі багатьох робіт [2-5]. Але більше за інших у створенні цільної теорії аномально низького тертя і зношування просунувся С. В. Федоров [3-5]. Його праці стали основними узагальнюючими дослідженнями в цьому напрямі. Серед вітчизняних дослідників багато уваги теорії аномально низького тертя і зношування приділяється авторами роботи [2].

Федоровим С. В. для аналізу АНТЗ було запропоновано використовувати поняття «механічного кванта – мінімальної кількості атомів, здатних забезпечувати конфігураційний розподіл наноструктури, що мають властивості зворотно сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху» [3-5]. Цей механічний квант «являє собою найменше структурне утворення в умовах пластичної деформації і утворюється при переході трибосистеми (деформованого об'єму) через гранично активований (критичний) стан внаслідок розвитку самоорганізаційних процесів адаптації трибосистеми. В об'ємі трибосистеми в умовах аномально низького тертя і зношування (елементарної трибосистеми) кількість таких механічних квантів (трибосистем) \hat{E} , тобто безпечна кількість циклів втомки, дорівнює $0,63 \cdot 10^8$. Механічний квант сам по собі є динамічним осцилятором дисипативних структур тертя, і його лінійний розмір дорівнює радіусу сферичного ідеального кристала – 7,177 нм» [3, 5]. Такий квантомеханічний підхід дозволив автору розглядати цей квант як «елементарну наноструктуру металевого твердого тіла» [3].

Таке припущення дозволило вважати, що сила тертя твердих тіл може бути переборена за рахунок лише внутрішніх сил.

Можна вважати, що цими силами виступає саме хвильова складова сили тертя.

Ця гіпотеза дозволила дослідникам розробити рекомендації для створення умов, за яких збільшується хвильова складова і досягаються умови АНТЗ. Рекомендації базуються на особливостях реологічної побудови поверхневого шару трибосистеми. При цьому одна поверхня, що бере участь у терті, є твердим (квазітвердим) тілом, а на другій поверхневий шар модифікований за рахунок методів програмного навантаження, управління тепловим потоком, трибоактивації активними елементами за допомогою

технології фінішної обробки та іншими способами [6, 7].

Дані дослідження подані у вигляді наукової парадигми, що дозволяє переводити трибосистему від нормального механохімічного тертя і зношування до АНТЗ [6-8].

Вигляд виразу для визначення сили тертя F_{fr} , де враховано вплив хвильової складової тертя F_w , що робить значний внесок у розсіювання підведеної при терті зовнішньої енергії та, власне, створює передумови для переходу трибосистеми в режим аномально низького тертя і зношування було запропоновано в роботах [9, 10]:

$$F_{fr} = |F_a + F_d| - |F_w|, \quad F_a + F_d \approx |F_w|, \quad (1)$$

де F_a – молекулярна (адгезійна) складова сили тертя;

F_d – механічна (деформаційна) складова сили тертя.

Хвильова складова F_w сили тертя F_{fr} є тим «ентропійним насосом», який частину зовнішнього тертя, що не компенсується, переводить у внутрішнє тертя» [9] і накопичує внутрішню енергію в пружному пластичному шарі реологічної моделі Шведова побудови трибосистеми [4, 9, 10]. Реологічна побудова та механізм дисипації зовнішньої енергії в умовах АНТЗ краще за все ілюструються як квазіпружна взаємодія поверхневого шару і ротаційно-пластична деформація підповерхневого шару, засновані на реологічній моделі Шведова.

Визначення мети та завдання дослідження. Останні досягнення трибології у вивченні АНТЗ можуть дозволити розробляти вузли тертя з кардинально підвищеними показниками зносостійкості [5, 6]. Але для відпрацювання практичних рекомендацій необхідно мати повне уявлення про фізичну сутність процесів, що відбуваються в ТС при АНТЗ.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження АНТЗ дозволили встановити реологічну побудову поверхневого шару в трибосистемі при переході до АНТЗ [8-10]. Особливості релаксації підведеної при терті енергії за таких умов контактної взаємодії викликають питання щодо пояснення фізичного сенсу коефіцієнта тертя в цьому випадку.

Метою даної роботи є встановлення фізичного сенсу коефіцієнта тертя трибосистем, що працюють в умовах АНТЗ. Для досягнення цієї мети необхідно визначити особливості реології трибосистем при АНТЗ та визначити умови, за яких такі особливості досягаються.

Основна частина дослідження. Розглянемо більш докладно перетворення енергії ΔE_w в контактній взаємодії. У процесі проковзування на кожному елементарному контакті генерується пружна хвиля. За квантовою механікою, енергія та імпульс, пов'язані з кожним нормальним коливанням (з кожною хвилею), кантуються, тобто можуть приймати лише дискретні значення. Вони стають кратними ($n = 0, 1, 2, \dots$) рівностям Луї де Бройля (дуалізм енергії та імпульсу частки, що рухається) [10], які

приймають фізичний сенс відповідно енергії та імпульсу «елементарного збудження» коливального руху у кристалі. Таке елементарне збудження можна розглядати як квазічастинку – фонон (енергетичний дефект твердого тіла) з квазіімпульсом \vec{V} та енергією:

$$\varepsilon(\vec{V}) = \hbar\omega(\vec{V}/\hbar), \quad (2)$$

де ε – енергія частинки, що рухається;

\vec{V} – імпульс руху частки;

\hbar – стала Планка;

ω – частота коливального руху хвилі.

З урахуванням прийнятої моделі структурування поверхні в умовах АНТЗ енергія розсіювання кожного механічного кванта дорівнює

$$\Delta E_{MK} = n(\hbar\omega(\vec{V}/\hbar)), \quad (3)$$

де n – ступінь збудження нормального колювання. Це кількість фононів з імпульсом $\hbar\vec{q}$ (де \vec{q} – хвильовий вектор, напрямком якого співпадає з напрямком розповсюдження хвилі) та енергією $\hbar\omega$.

Для всієї трибосистеми, що працює в умовах АНТЗ, її енергія розсіювання дорівнює

$$\Delta E_{TC} = \Delta E_{MK}\hat{\varepsilon}, \quad (4)$$

де $\hat{\varepsilon}$ – кількість механічних квантів, що беруть участь у взаємодії [10].

Вираз для імпульсу сили тертя трибосистеми, визначений після розв'язання рівняння Фокера-Планка, що описує марківський процес розподілу імпульсів сили тертя на локальних ділянках плям контакту трибосистеми, було запропоновано в роботах [9, 10].

Замінивши введене в цих роботах позначення імпульсу сили $v(x(t))$ на \vec{V}_{TC} , запишемо підсумковий вираз для імпульсу

\vec{V}_{TC} сили тертя трибосистеми, що працює в стаціонарних умовах аномально низького тертя і зношування [9, 10]:

$$\vec{V}_{TC} = e \frac{\Delta E_{MK}\hat{\varepsilon}}{\Theta}. \quad (5)$$

По суті ця величина накладає граничні умови на швидкість взаємного переміщення, достатню для квантування енергетичного обміну. Вона є фактором переходу до аномально низького тертя і зношування, якщо імпульс сили від молекулярно-механічної та хвильової складової близький за абсолютним значенням [11].

Враховуючи вищевикладене, можна надати фізичного сенсу коефіцієнту тертя для нормального механохімічного зношування μ_{fr} та АНТЗ μ_w :

$$\mu_{fr} = \frac{F}{N} = \frac{\Delta U}{Nl}, \quad (6)$$

де F – сила тертя $F = \frac{\Delta U}{l}$;

N – нормальне навантаження на трибосистему;

ΔU – зміна внутрішньої енергії поверхневого шару;

l – шлях тертя.

Таким чином, фізичний сенс коефіцієнта тертя нормального механохімічного зношування μ_{fr} має дуалізм, присутній у молекулярно-механічній теорії тертя і зношування [3, 4, 11]. З одного боку, це параметр, що характеризує опір відносному переміщенню поверхонь, бо він позначає частку енергії, що «знищується» тертям у вигляді запасеної прихованої енергії ΔU відносно роботи зовнішніх сил (параметр Nl узагальнено характеризує роботу зовнішніх сил, що виконують на шляху l роботу). З іншого боку, це узагальнена характеристика пошкоджуваності, бо визначається

щільністю прихованої енергії, пов'язаної з пошкоджуваністю.

Аналогічно визначимо коефіцієнт тертя хвильової складової μ_w :

$$\mu_w = \frac{\Delta E_{TC}}{Nl} = \frac{\Delta E_{mk} \hat{\varepsilon}}{Nl}. \quad (7)$$

Фізичний сенс у даному випадку характеризує розсіювання кінетичної енергії ΔE_{TC} сил, що виникає при квазіпружній взаємодії, відносно параметра Nl , що узагальнено характеризує роботу внутрішніх сил на шляху тертя l . З іншого боку, це узагальнена характеристика беззносності. При АНТЗ основна складова сили тертя припадає на кінетичну (хвильову) складову, що формується при різниці швидкостей гальмування при молекулярно-механічній взаємодії шорсткостей і проковзуванні при їх розгоні.

За даною моделлю формується так само імпульс сили і від молекулярно-механічної складової сили тертя. Відмінністю є лише те, що від хвильової складової джерелом цього імпульсу $\vec{V}_{TC.k}$ є зміна кінетичної енергії ΔE_k , а джерелом імпульсу сили $\vec{V}_{TC.п}$ від молекулярно-механічної складової є зміна потенційної енергії ΔE_n .

Всі процеси, що протікають у ТС, які працюють в умовах АНТЗ, можна подати у вигляді термодинамічного рівняння

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (8)$$

де ΔG – зміна термодинамічного потенціалу ТС, який оцінює роботу при протіканні всіх процесів у ТС на всіх етапах (утворення та руйнування вторинних структур, дифузійні, хімічні та мікрометалургійні процеси тощо). Відображує максимальну роботу процесу;

ΔH – зміна ентальпії (тепловміст) ТС, характеризує зміну внутрішньої енергії ТС при перетвореннях (або тепловий ефект перетворення). Енергетична складова;

T – температура ТС;

ΔS – зміна ентропії ТС.

Тут $T\Delta S$ – ентропійний член, з яким пов'язана енергія.

В умовах АНТЗ одночасно виконуються дві роботи. Перша робота з подолання сил тертя від молекулярно-механічної складової сили тертя, що оцінюється зміною термодинамічного потенціалу ΔGn . Результатом цієї роботи є зміна (накопичення) потенційної енергії ΔE_n з виділенням тепла Q_n . У результаті взаємодії на плямах фактичного контакту формується імпульс сили $\vec{V}_{TC.п}$.

А в процесі проковзування в ТС виконується друга робота внутрішніх сил, що оцінюється термодинамічним потенціалом ΔG_k . Результатом цієї роботи є зміна кінетичної енергії ΔE_k , що виділяється з поглинанням із ТС тепла Q_k та формуванням імпульсу сили $\vec{V}_{TC.k}$.

В умовах АНТЗ $\vec{V}_{TC.п} = \vec{V}_{TC.k}$ і підтримується рівновага між виділеною та поглиненою теплотою $Q_n = Q_k$, що пояснюється прагненням будь-якої системи до мінімуму вільної енергії.

Схематично робота ТС в умовах АНТЗ може бути пояснена рисунком.

Таким чином, у ТС, що працює в режимі АНТЗ, можлива рівноважна та зворотна зміна деякої незначної кількості енергії без виконання роботи. Даний висновок узгоджується з гіпотезою аномально низького тертя, сформульованою Вейником [1]. Тепловиділення трибосистеми в даному випадку наближується до нуля.

При зміні зовнішніх умов тертя змінюється ступінь збудження ТС n , що залежить від кількості механічних квантів $\hat{\varepsilon}$. Будь-яка зміна в ТС, яка виводить її з рівноваги, за принципом Ле Шательє, ініціює в ТС процеси, що намагаються повернути її у вихідне положення. За ці процеси в нашій моделі відповідає модуль канонічного розподілу енергії Θ , який регулюється мікрогеометрією поверхневого шару ТС.



Рис. Схематичне зображення роботи ТС в умовах АНТЗ

Можливість досягнення «нульового тертя» (аномального низького тертя і зношування) у реальних трибосистемах деякі дослідники вважали нонсенсом з причини начебто «безповоротності перетворення молекулярно-механічної складової сили тертя в термічну складову» [1].

Критерій безповоротності K відповідно до роботи [1] визначає відносну роль ефекту тертя, тобто ступеня безповоротності процесу перенесення узагальненої кінетичної взаємодії при гальмуванні та розгоні мікрошорсткості на плямі контакту. При терті одночасно виконуються дві роботи. Перша здійснюється зовнішніми силами для подолання сили тертя і може бути оцінена термодинамічним потенціалом G_n . А друга виконується внутрішніми силами (пружності) у процесі проковзування в ТС й оцінюється термодинамічним потенціалом G_k .

Можливість досягнення умов АНТЗ, за Вейником [1], характеризується критерієм безповоротності

$$K = -\frac{\Delta G}{G_{\Pi}}, \quad (9)$$

де $\Delta G = G_{\Pi} - G_{\text{к}}$.

Це відношення показує, яку частину загальної роботи складає робота зовнішніх сил тертя (G_n). Таким чином, автор роботи [1] вважав можливим досягнення АНТЗ тоді, коли робота зовнішніх сил мізерно мала порівняно з загальною роботою зовнішніх сил. Із зменшенням критерію K ступінь безповоротності процесу зменшується. У межі, коли $K \rightarrow 0$, процес стає зворотним. Зворотному процесу відповідає умова $K = -\frac{\Delta G}{G_{\Pi}} \ll 1$. При цьому

робота тертя мізерно мала порівняно з загальною роботою, виконаною над ТС при контактній взаємодії.

Явища АНТЗ за своєю фізичною природою близькі до явища надпровідності. У першому випадку аналізується тертя, а в другому – опір електричного струму.

Висновки. Таким чином, проведені дослідження показують, що основною причиною переходу трибосистем до аномально низького тертя і зношування є реологічні властивості поверхневого шару трибосистеми.

В умовах АНТЗ одночасно виконуються дві роботи. Перша – робота з подолання сил тертя від молекулярно-механічної складової сили тертя. Результатом цієї роботи є зміна (накопичення) потенційної енергії ΔE_n з виділенням тепла Q_n . У результаті взаємодії

на плямах фактичного контакту формується імпульс сили $\vec{V}_{TC.п}$. А в процесі проковзування виконується друга робота внутрішніх сил. Результатом цієї роботи є зміна кінетичної енергії ΔE_k , що виділяється з поглинанням із ТС тепла Q_k та формуванням імпульсу сили $\vec{V}_{TC.к}$. В умовах АНТЗ $\vec{V}_{TC.п} = \vec{V}_{TC.к}$ і підтримується рівновага між виділеною та поглиненою теплотою $Q_n = Q_k$.

Установлено, що умовою досягнення аномально низького тертя і зношування є рівність робіт, які виконують зовнішні та внутрішні сили в умовах контактної взаємодії.

Структурно-енергетичний підхід до контактної взаємодії дозволив встановити фізичний сенс коефіцієнта тертя, що узагальнено характеризує роботу зовнішніх і внутрішніх сил на шляху тертя трибосистем.

Список використаних джерел

1. Вейник А. И. Термодинамическая пара. Минск: Наука и техника, 1973. 383 с.
2. Запорожець В. В., Стадниченко В. М., Трошин О. М. Механізм дисипації енергії при терті металокерамічного шару в технологіях триботехнічного відновлення деталей машин і механізмів. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків, 2010. № 2 (22). С. 113–118.
3. Федоров С. В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма. В кн.: *Известия КГТУ*. Калининград, 2007. № 11. С. 22–31.
4. Федоров С. В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма. *Вестник науки и образования Северо-запада России (Научный рецензируемый электронный журнал)*. Калининград, 2016. Т. 2. № 1. С. 1–14. URL: <http://vestnik-nauki.ru>. Дата оновлення: 07.11.2016.
5. Fedorov S.V. Nano-Structural Standard of Friction and Wear. *Tribology in Industry*. 2018. Vol. 40 (2). P. 225-238.
6. The effects of stored energy on wear resistance of friction stir processed pure Ti / L. Jiang et al. *Results in Physics*. Vol. 12. 2019. March. P. 1276-1284.
7. Bhushan B. *Nanotribology and Nanomechanics an Introduction*. Springer-Verlag, Heidelberg : Berlin, 2005. 1148 p.
8. Stadnychenko V., Varvarov V. Results of Theoretical and Experimental Researches of Anomalous Low Friction and Wear in Tribosystems. *Advances in Materials*. 2019. Vol. 8. №4. P. 156-165.
9. Войтов В. А., Стадниченко В. М., Варваров В. В. Теоретичні та природні передумови досягнення аномально низького тертя та зношування в трибології. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2019. № 2(60). С. 113-125.
10. Войтов В. А., Стадниченко В. М., Варваров В. В., Вахнюк С. А. Структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків, 2019. № 16. С. 88-101.
11. Tarasov V. E. Tarasova V. V. Time-dependent fractional dynamics with memory in quantum and economic physics. *Annals of Physics*. 2017. August. Vol. 383. P. 579-599.

Варваров Валерій Володимирович, науковий співробітник науково-дослідної лабораторії Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. E-mail: varvarov-@ukr.net. Тел: +380577021715. ORCID iD: 0000-0003-1273-5605.

Varvarov Valerii Volodymyrovych, Senior Research of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Forces University. E-mail: varvarov-@ukr.net. Tel: +380577021715. ORCID iD: 0000-0003-1273-5605.

Статтю прийнято 05.12.2019 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 691.3; 691.5

**РЕГУЛЮВАННЯ ВЛАСНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ШЛАКОЛУЖНИХ
ДРІБНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ КОМПЛЕКСНИМИ
БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ КОРОЗІЇ
СТАЛЕВОЇ АРМАТУРИ**

Д-р техн. наук П. В. Кривенко, кандидати техн. наук О. М. Петропавловський,
І. І. Руденко, О. П. Констатинівський

**CONTROL OF ALKALI-ACTIVATED SLAG CEMENT FINE CONCRETES PROPER
DEFORMATIONS BY COMPLEX MULTIFUNCTIONAL ADDITIVES BASED ON
SALTS-ELECTROLYTES FOR PREVENTION OF STEEL REINFORCEMENT
CORROSION**

D. Sc. (Tech.) P. V. Krivenko, PhD (Tech.) O. M. Petropavlovskiy, PhD (Tech.) I. I. Rudenko,
PhD (Tech.) O. P. Konstantynovskiy

***Анотація.** Запропоновано комплексні багатофункціональні добавки на основі солей-електролітів NaNO_3 , Na_2SO_4 і Na_3PO_4 , що забезпечують зменшення усадки дрібнозернистого бетону на основі шлаколужного цементу з 0,984 до 0,560-0,605 мм/м, 0,625-0,640 мм/м і 0,713-0,700 мм/м відповідно. Зменшення деформацій усадки дрібнозернистих бетонів розглядається як засіб запобігання корозії сталевій арматури.*

***Ключові слова:** шлаколужний цемент, дрібнозернистий бетон, сіль-електроліт, поверхнево-активна речовина, комплексна добавка, корозія сталевій арматури, усадка, міцність.*

***Abstract.** The actuality of alkali-activated slag cements (AASC) implementation is due to their conformity with modern tendencies concerning efficient consumption of raw materials and energy, while ensuring high functionality of mortars and concretes. AASC concretes are characterized by increased strength, sulfate resistance, freeze-thaw resistance and weather resistance in comparison with analogues based on traditional clinker cements. The modern requirements to high consistency fresh concretes are governed by practice. This way the disturbance of reinforcement passive state can be caused by changes in hardened concrete structure. Shrinkage reduction of AASC concretes due to complex multifunctional additives (CA's) based on salts-electrolytes is seen as a way to prevent corrosion of steel reinforcement. The aim of the paper is substantiation of CA's presented by the system «ordinary portland cement clinker (OPC clinker) - salt-electrolyte - surfactant» for adjustment of proper deformations and strength of AASC fine concrete with increasing density to prevent corrosion of steel reinforcement.*

Modification of AASC by CA based on NaNO_3 provides shrinkage reduction from 0,984 down to 0,560 - 0,605 mm/m ($t=20\pm 2$ °C, R.H.=65 %). Unlike, CA based on Na_2SO_4 causes shrinkage mitigation down to 0,625 - 0,640 mm/m. CA based on Na_3PO_4 minimizes shrinkage to 0,713 - 0,700 mm/m. Shrinkage mitigation is explained by less water, higher crystallinity of hydrated phases as well as by formation of minamiit $(\text{Na},\text{Ca}_{0.5})\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, calcium hydronitroaluminate

3CaO·Al₂O₃·Ca(NO₃)₂·10H₂O and calcium hydroxylapatite Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂ crystals versus salt-electrolyte as ingredient of CA's. The 28 day compressive strength of modified AASC concrete is not less than the reference one.

Keywords: *alkali-activated slag cement, fine concrete, salt-electrolyte, surfactant, complex additive, steel reinforcement corrosion, shrinkage, strength.*

Вступ. Сучасні тенденції у світовому матеріалознавстві актуалізують питання запровадження цементів, альтернативних традиційним, виробництво яких здійснюється за ресурсо- та енергозберігаючими технологіями при забезпеченні високої функціональності будівельних матеріалів на їх основі. У ряді робіт показано ефективність заміни частини клінкеру в складі цементів мінеральними добавками (цеоліт, шлак, зола винесу, високодисперсна крейда тощо), що наряду зі зменшенням емісії CO₂ забезпечує підвищені експлуатаційні властивості бетонів і розчинів: міцність [1, 2], корозійну стійкість [3], водонепроникність [4], морозостійкість [5] тощо.

Найбільш перспективними в'язучими речовинами, з огляду на сучасні тенденції сталого розвитку людства, є шлаколузні цементы (далі ШЛЦ). Екологічний ефект використання ШЛЦ обумовлений можливістю утилізації побічних продуктів і відходів виробництва, збереженістю природних ресурсів і зменшенням емісії CO₂ [6, 7]. При цьому бетони на основі ШЛЦ характеризуються більш високими показниками міцності [8], сульфатостійкості [9], морозостійкості [10] та атмосферостійкості [11, 12] порівняно з аналогами на основі традиційних клінкерних цементів як загальнобудівельного, так і спеціального призначення.

Довговічність ШЛЦ бетонів, у т. ч. армованих сталеву арматурою, отриманих із жорстких бетонних сумішей на шлаколузних цементах, доведена багаторічним досвідом експлуатації [13–15]. Однак сучасна практика будівництва висуває високі вимоги до технологічності бетонних сумішей. Виконання цих вимог викликає необхідність використовувати

високорухомі бетонні суміші, що обумовлює зміни в структурі бетону, які можуть спричинювати порушення пасивного стану сталеву арматури. Вказане обумовлює необхідність розроблення заходів запобігання корозії сталеву арматури в ШЛЦ бетонах. Одним з таких засобів є зменшення деформацій усадки, підвищення значення яких у ШЛЦ бетонах обумовлено високим вмістом гелевої фази в гідратованому ШЛЦ [16]. Високі значення усадки можуть призвести до підвищеного тріщиноутворення в бетоні і зменшення довговічності конструкцій у цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі засоби управління усадкою традиційних цементів є неефективними у випадку лужних цементів [17, 18]. Розглянуто принципову можливість зменшення деформації усадки ШЛЦ шляхом впливу на їх структуроутворення комплексними багатофункціональними добавками (далі КД) системи «портландцементний клінкер – сіль-електроліт – поверхнево-активна речовина (далі ПАР)» на основі сульфату натрію Na₂SO₄ і нітрату натрію NaNO₃ [16, 19, 20]. Перспективу як компонента КД має також сіль-електроліт у вигляді тринатрійфосфату Na₃PO₄ (далі ТНФ), що сповільнює строки тужавлення ШЛЦ [21, 22]. Крім того, ТНФ визначає зменшення капілярної пористості штучного каменю внаслідок ущільнення структури за рахунок формування гідроксіапатиту Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂ [23].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є обґрунтування складу КД системи «портландцементний клінкер – сіль-електроліт – ПАР» для регулювання власних деформацій і міцності дрібнозернистого бетону на основі ШЛЦ (далі ШЛЦ бетону) із підвищенням

щільності структури для попередження корозії сталевій арматурі.

Для досягнення мети вирішувалися такі завдання:

- оптимізувати КД системи «портландцементний клінкер – сіль-електроліт – ПАР» за критеріями власних деформацій і міцності ШЛЦ бетонів;
- обґрунтувати зазначені ефекти з точки зору впливу КД на структуроутворення ШЛЦ.

Сировинні матеріали. У дослідженнях як контрольний склад використано ШЛЦ такого складу: гранульований доменний шлак (далі ГДШ) – 88,20 %, метасилікат натрію п'ятиводний ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) у сухому порошкоподібному стані – 11,80 % (3,91 % в перерахунку на Na_2O).

ГДШ (CaO – 44,60 %; SiO_2 – 37,90 %; Al_2O_3 – 6,85 %; Fe_2O_3 – 0,31 %; MgO – 5,21 %; Mn – 0,11 %; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ – 1,13 %; TiO_2 – 0,31 %) характеризувався питомою поверхнею 4500 cm^2/g (за Блейном), модулем основності 1,11 і вмістом склофазы 84,0 %.

Як складові КД використано:

- портландцементний клінкер (далі клінкер) (CaO – 66,15 %; SiO_2 – 22,61 %; Al_2O_3 – 5,29 %; Fe_2O_3 – 3,93 %; MgO – 0,84 %; Na_2O – 0,15 %; K_2O – 0,98 %; SO_3 – 0,50 %) з питомою поверхнею 4500 cm^2/g (за Блейном);

- солі-електроліти – сульфат натрію Na_2SO_4 (CAS № 7757-82-6), нітрат натрію NaNO_3 (CAS № 7631-99-4), ТНФ (CAS № 7601-54-9);

- ПАР двох типів – лігносульфонат натрію (далі ЛСТ) згідно з CAS № 8061-51-6 ($\text{pH} \geq 8,5$) і глюконат натрію (далі Гл) згідно з CAS № 527-07-1.

Як дрібний заповнювач ШЛЦ бетону використовували стандартний кварцовий пісок Гусарівського родовища (Україна) згідно з ДСТУ Б В.2.7-189:2009.

Методи досліджень. Водоредуруючий ефект дії КД оцінювали за зменшенням значень В/Ц дрібнозернистих бетонних сумішей (1:3) при розпливі на струшуючому

столику 106–115 мм, виміряному згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009.

Міцність і власні деформації ШЛЦ бетону від технологічної вологості при висиханні до рівноважної визначали на зразках $40 \times 40 \times 160$ мм. Після виготовлення зразки тужавили у формах з ізолюваною поверхнею впродовж однієї доби, після чого були розпалублені; сім діб зберігалися в нормальних умовах ($t = 20 \pm 2$ °С, $R.H. = 95 \pm 5$ %) і після цього в ексікаторі над пересиченим розчином аміачної селітри (NH_4NO_3) при температурі $t = 20 \pm 2$ °С та відносній вологості $R.H. = 65$ % (стандартні умови згідно з національним стандартом України ДСТУ Б В.2.7-216). Такий режим зберігання зразків відповідає режимам тужавлення в реальних умовах на будівельному майданчику. При розрахунках власних деформацій ШЛЦ бетону вихідною прийнято довжину зразків на одну добу.

Дослідження мікроструктури цементного каменю після 28 діб тужавлення в нормальних умовах здійснено за допомогою зондового аналізу на растровому електронному мікроскопі-мікроаналізаторі.

Оптимізацію складів КД здійснювали за допомогою методів математичного планування експерименту; розрахунки здійснювали в програмному середовищі Statistica. Як вихідні критерії оцінювання при оптимізації складів КД прийнято усадку ШЛЦ бетону при задовільних значеннях міцності на згин і стиск на 2 і 28 добу тужавлення (не менше контрольного складу).

Основна частина дослідження. Дрібнозернистий бетон на основі ШЛЦ системи «ГДШ – метасилікат натрію» (контрольний склад) при В/Ц = 0,29 характеризується такими показниками після тужавлення: міцність на згин / стиск (МПа) на 2 добу – 5,0 / 28,8, на 28 добу – 7,5 / 50,3. Усадка контрольного складу на 104 добу становить 0,984 мм/м.

Оптимізацію складів КД системи «клінкер – сіль-електроліт – ПАР» здійснено за двофакторним трирівневим планом експерименту. Як змінні фактори прийнято:

X_1 – вміст клінкеру в складі КД, 4,00–10,00 % маси ГДШ; X_2 – вміст солі-електроліту (Na_3PO_4 , Na_2SO_4 і NaNO_3) в складі КД, 1,50–2,50 % маси ГДШ. Вміст ПАР в складі КД прийнято у відсотках маси ГДШ: ЛСТ – 0,30, Гл – 0,15. Наведені інтервали зміни факторів обумовлені передбаченими областями можливої зміни усадки ШЛЦ бетону згідно з результатами попередніх досліджень [16, 19, 20].

Побудовано криві зміни усереднених значень усадки ШЛЦ бетону, модифікованого КД оптимізованих складів на основі NaNO_3 , Na_2SO_4 і Na_3PO_4 (рис. 1). Використання КД забезпечує зменшення В/Ц з 0,29 (для контрольного складу) до 0,26.

Визначено оптимальний склад КД на основі NaNO_3 , % маси ГДШ: ЛСТ – 0,30, Гл – 0,15, клінкер – 6,50–7,70, NaNO_3 – 1,40–2,00. У даному випадку спостерігається збільшення міцності затужавілого ШЛЦ бетону на згин / стиск з 5,0 / 28,8 МПа до

(6,0–6,3) / (26,0–28,0) МПа на 2 добу, з 7,5 / 50,3 МПа до (8,8–9,4) / (48,0–50,0) МПа на 28 добу. При цьому усадка ШЛЦ бетону впродовж 48 діб збільшується до 0,750 мм/м, після чого спостерігається тенденція до розширення і на 104 добу усадка зменшується з 0,984 (контрольний склад) до 0,560–0,605 мм/м (рис. 1).

Оптимізований склад КД на основі Na_2SO_4 , % маси ГДШ: ЛСТ – 0,30, Гл – 0,15, клінкер – 4,00–4,65, Na_2SO_4 – 1,50–1,59. При використанні КД в цьому випадку спостерігається збільшення міцності затужавілого ШЛЦ бетону: міцність на згин / стиск – (8,5–8,8) / (32,0–34,0) МПа на 2 добу і (12,0–12,7) / (54,0–56,0) МПа на 28 добу. Після збільшення усадки до 0,830–0,814 мм/м на 55 добу спостерігається компенсація власних деформацій, що супроводжується зменшенням усадки до 0,625–0,640 мм/м на 104 добу (рис. 1).

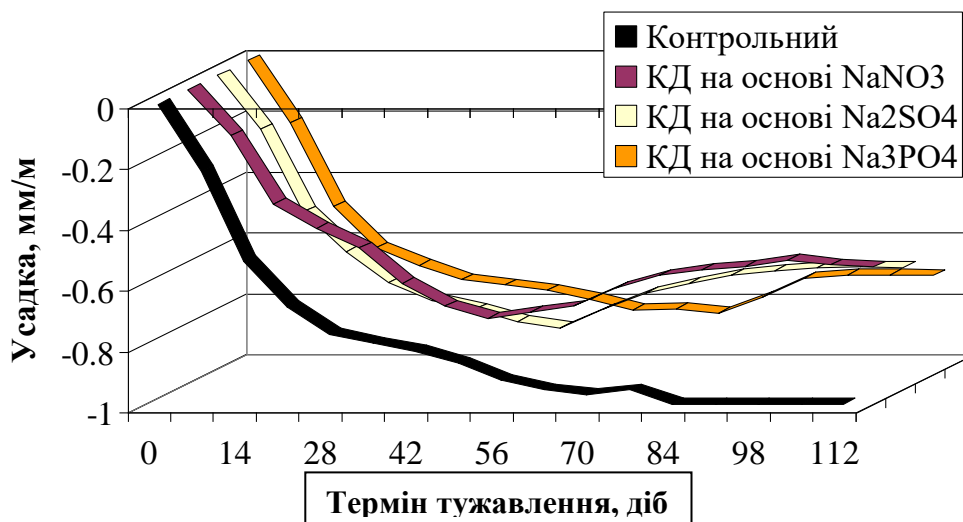


Рис. 1. Криві зміни середніх значень усадки ШЛЦ бетонів

Виявлено також оптимальний склад КД на основі Na_3PO_4 , % маси ГДШ: ЛСТ – 0,30, Гл – 0,15, клінкер – 4,00–4,60, Na_2SO_4 – 1,80–2,05. Міцність на згин / стиск ШЛЦ бетону, модифікованого такою КД, збільшується внаслідок зменшення В/Ц до (6,1–6,5) / (27,0–29,0) МПа на 2 добу і до

(9,5–10,0) / (49,0–51,0) МПа на 28 добу. Має місце певне розширення ШЛЦ бетону після 76 доби, внаслідок чого усадка зменшується до 0,713–0,700 мм/м на 104 добу (рис. 1).

У загальному випадку зменшення усадки обумовлено як водоредуруючим ефектом дії КД, так і впливом КД на процеси

структурування штучного каменю, що пояснює різну міцність. Особливості формування мікроструктури ШЛЦ, модифікованих КД, вивчено за допомогою електронної мікроскопії і зондового аналізу (рис. 2).

Аналіз електронних фотографій мікроструктури гідратованого ШЛЦ дозволяє ідентифікувати низькоосновні гідросилікати кальцію в субмікрокристалічному (гелеподібному) стані (рис. 2, а), що й обумовлює підвищені значення усадки ШЛЦ бетону (вміст оксидів, за зондовим аналізом, %: CaO – 32,16, SiO₂ – 37,82, Al₂O₃ – 12,48, Na₂O – 9,77, MgO – 5,03, SO₃ – 2,73).

Порівняно з результатами попередніх досліджень [16, 20] зафіксовано підвищення ступеня кристалічності гідратних фаз ШЛЦ при використанні КД оптимізованого складу. За результатами електронної мікроскопії, використання КД на основі NaNO₃ сприяє утворенню шаруватих пластинчастих кристалічних формувань, які

можна віднести до гідронітроалюмінату кальцію $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(NO_3)_2 \cdot 10H_2O$ відповідно до вмісту оксидів, за зондовим аналізом, %: CaO – 38,26, Al₂O₃ – 17,87, N₂O – 21,87, MgO – 2,47, SO₃ – 1,40) (рис. 2, б) [24].

У фазовому складі ШЛЦ, модифікованого КД на основі Na₂SO₄, спостерігаються гексагональні пластинчасті кристалічні структури типу мінаміїту (Na,Ca_{0.5})Al₃(SO₄)₂(OH)₆ (вміст оксидів, за зондовим аналізом, %: CaO – 4,51, Al₂O₃ – 37,77, SO₃ – 36,41, Na₂O – 3,80) (рис. 2, в) [25]. Крім того, у складі продуктів гідратації ШЛЦ, модифікованого КД на основі Na₃PO₄ разом з гідросилікатами і гідроалюмосилікатами кальцію формуються тонкопластинчасті пірамідальні кристали гідроксіапатиту кальцію Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂ (вміст оксидів, за зондовим аналізом, %: CaO – 57,82, Al₂O₃ – 5,34, P₂O₅ – 47,82, Na₂O – 0,64) (рис. 2, г) [23].

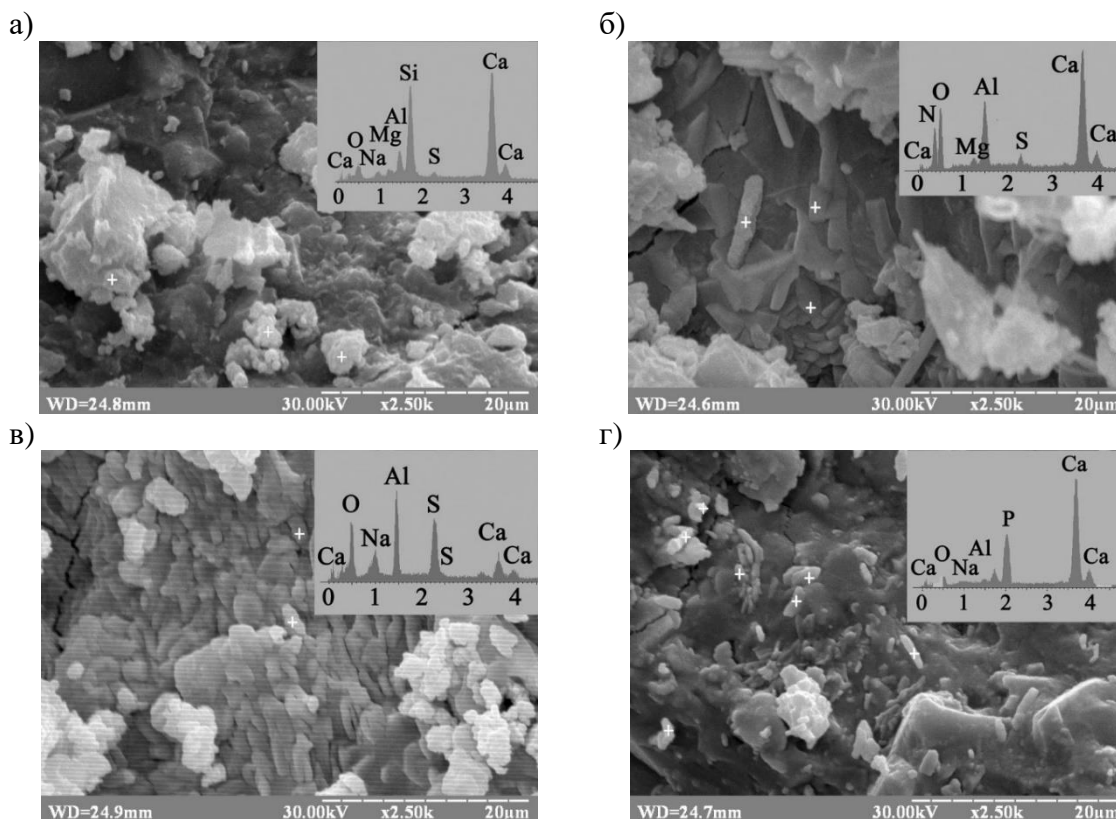


Рис. 2. Електронні мікрофотографії поверхні сколу ШЛЦ після 28 діб тужавлення: контрольний (немодифікований) (а); модифікований КД на основі NaNO₃ (б); модифікований КД на основі Na₂SO₄ (в); модифікований КД на основі Na₃PO₄ (г)

Висновки:

1. Оптимізація складу КД системи «клінкер – сіль-електроліт – ПАР» на основі NaNO_3 , Na_2SO_4 і Na_3PO_4 дозволила зменшити усадку ШЛЦ бетону на 104 добу тужавлення з 0,984 до 0,560–0,605 мм/м, 0,625–0,640 мм/м і 0,713–0,700 мм/м відповідно. При цьому міцність ШЛЦ бетону, модифікованого КД, практично відповідає значенням контрольного складу.

2. Регулювання власних деформацій модифікованого ШЛЦ бетону в напрямку зменшення усадки при збереженні міцності забезпечується зменшенням вмісту води, створенням додаткового напруження в міжфазному просторі гідратних новоутворень ШЛЦ завдяки прискореному формуванню кристалів мінаміту, гідронітроалюмінату кальцію і гідроксіапатиту відповідно

до аніонної складової, використаної в складі КД, солі натрію (NO_3^- , SO_4^{2-} і PO_4^{3-}). Зменшення деформацій усадки при підвищенні щільності порової структури штучного каменю знижує схильність до тріщиноутворення і відповідно зменшує ризик ініціації корозії сталевих арматур.

Подяка. Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, що виконується в рамках бюджетного фінансування № 1020U001010, а також за розвиток теми досліджень за програмою наукового співробітництва COST Action CA15202 SARCOS «Self-Healing concrete: the path to sustainable construction», що діє в рамках проекту європейського рівня HORIZON 2020, http://www.cost.eu/COST_Actions/ca/CA15202.

Список використаних джерел

1. Kropyvnytska T., Rucinska T., Ivashchyshyn H., Kotiv R. Development of Eco-Efficient Composite Cements with High Early Strength. *International Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. P. 211-218. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_27.
2. Markiv T., Sobol K., Petrovska N., Hunyak O. The Effect of Porous Pozzolanic Polydisperse Mineral Components on Properties of Concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47 P. 275-282. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_35.
3. Borziak O. S., Plugin A. A., Chepurna S. M., Zavalniy O. V., Dudin O. A. The effect of added finely dispersed calcite on the corrosion resistance of cement compositions. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708(1). 012080. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012080>.
4. Borziak O., Chepurna S., Zidkova T., Zhyhlo A., Ismagilov A. Use of a highly dispersed chalk additive for the production of concrete for transport structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 03003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003003>.
5. Moskalenko O., Runova R. Ice Formation as an Indicator of Frost-Resistance on the Concrete Containing Slag Cement in Conditions of Freezing and Thawing. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 865. P. 145-150. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.865.145>.
6. Provis J. L., van Deventer J. S. J. Geopolymers and Other Alkali-Activated Materials. *In book: Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Elsevier*. 2019. P. 779-805. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00016-2>.
7. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Kovalchuk O., Lapovska S., Pasko A. Design of the composition of alkali activated portland cement using mineral additives of technogenic origin. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4(6-94). P. 6-15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140324>.
8. Chistyakov V. V., Grankovskii I. G., Gots V.I. Structure formation upon hardening of slag-alkali binder. *Journal of applied chemistry of the USSR*. 1986. 59, 3 pt 1. P. 542-546.

9. Kryvenko P., Guzii S., Kovalchuk O., Kyrychok V. Sulfate resistance of alkali activated cements. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 865. P. 95-106. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.865.95>.
10. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Kovalchuk O. A comparative study on the influence of metakaolin and kaolin additives on properties and structure of the alkali-activated slag cement and concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, № 6 (91). P. 33-39. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.119624>.
11. Pushkarova E., Gots V., Gonchar O. Stability of hydrosulfoaluminosilicate compounds and durability of an artificial stone based on them. *Brittle Matrix Composites*. Vol. 8. 2006. P. 399-408.
12. Pushkarova E., Gots V., Gonchar O. Stability of hydrosulfoaluminosilicate compounds and durability of an artificial stone based on them (Book Chapter). *Brittle Matrix Composites*. 2007. Vol. 8. P. 399-408. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857093080.399>.
13. Рунова Р. Ф., Носовський Ю. Л., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. В'язучі речовини: підручник. Київ: Основа, 2012. 448 с.
14. Bernal S. A., Provis J. L. Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives. *Journal of the American Ceramic Society*. 2014. Vol. 97 (4). P. 997-1008.
15. Awoyera P., Adesina A. Durability Properties of Alkali Activated Slag Composites: Short Overview. *A. Silicon*. 2020. 12. P. 987-996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00199-1>.
16. Krivenko P., Gots V., Petropavlovskiy O., Rudenko I., Konstantynovskiy O., Kovalchuk A. Development of decisions for alkali-activated cements proper deformations control. *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5, № 6 (101). P. 24-32. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181150>.
17. Yuan X.-H., Chen W., Lu Z.-A., Chen H. Shrinkage compensation of alkali-activated slag concrete and microstructural analysis. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 66422-428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.085>.
18. Штарк Й., Вихт Б. Цемент и известь: монографія / пер. с нем. А.Тулаганова; под ред. П. Кривенко. Киев, 2008. 480 с.
19. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Rudenko I., Konstantynovskiy O., Kovalchuk A. Alkali activated portland cement with adjustable proper deformations for anchoring application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE)*. 2019. Vol. 708. 012090. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012090>.
20. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Rudenko I., Konstantynovskiy O. The influence of complex additive on strength and proper deformations of alkali-activated slag cements. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 13-19. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.13>.
21. Kalina L., Bílek V., Komosná K., Novotný R., Tkacz J. Effect of Phosphates on the Hydration Process of Alkali Activated Materials. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 851. P. 63-68. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.851.63](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.851.63).
22. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Kovalchuk O., Rudenko I., Konstantynovskiy O. Enhancement of alkali-activated slag cement concretes crack resistance for mitigation of steel reinforcement corrosion. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 166. 06001. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016606001>.
23. Kalina L., Bílek V., Novotný R., Mončeková M., Másilko J., Koplík J. Effect of Na₃PO₄ on the Hydration Process of Alkali-Activated Blast Furnace Slag. *Materials*. 2016. Vol. 9(5). № 395. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9050395>.
24. Plugin A. A., Runova R. F. Bonding calcium chloride and calcium nitrate into stable hydration portland cement products. Stability conditions of calcium hydrochloraluminates and calcium hydronitroaluminates. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018. Vol. 36. P. 69-73. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.36.69>.

25. Bayliss P., Kolitsch U, Nickel E., Pring A. Alunite supergroup: recommended nomenclature. *Mineralogical Magazine*. 2016. Vol. 74 (5). P. 919-927. DOI: <https://doi.org/10.1180/minmag.2010.074.5.919>.

Кривенко Павло Васильович, доктор технічних наук, професор, директор Науково-дослідного інституту в'язучих речовин і матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури.

ORCID iD: 0000-0001-7697-2437. Тел.: (044) 245-48-30. E-mail: pavlo.kryvenko@gmail.com.

Петропавловський Олег Миколайович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту в'язучих речовин і матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури. ORCID iD: 0000-0002-3381-1411. Тел.: (044) 241-54-44. E-mail: oleg.petropavlovskii@gmail.com.

Руденко Ігор Ігоревич, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту в'язучих речовин і матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури.

ORCID iD: 0000-0001-5716-8259. Тел.: (044) 241-54-92. E-mail: igor.i.rudenko@gmail.com.

Константиновський Олександр Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури.

ORCID iD: 0000-0002-7936-5699. Тел.: (044) 245-48-43. E-mail: alexandrkp@gmail.com.

Kryvenko Pavlo Vasylovych, DSc (Eng), Prof., Director, Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv national university of construction and architecture. ORCID iD: 0000-0001-7697-2437. Tel.: (044) 245-48-30. E-mail: pavlo.kryvenko@gmail.com.

Petropavlovskiy Oleh Mykolaiovych, PhD (Eng), Chief scientist, Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv national university of construction and architecture. ORCID iD: 0000-0002-3381-1411. Tel.: (044) 241-54-44. E-mail: oleg.petropavlovskii@gmail.com.

Rudenko Igor Igorevych, PhD (Eng), Senior scientist, Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv national university of construction and architecture. ORCID iD: 0000-0001-5716-8259. Tel.: (044) 241-54-92. E-mail: igor.i.rudenko@gmail.com.

Konstantynovskiy Oleksandr Petrovych, PhD (Eng), Associate Professor, technology of building constrictions and products (TBCP) department, Kyiv National University of Construction and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-7936-5699. Tel.: (044) 245-48-43. E-mail: alexandrkp@gmail.com.

Статтю прийнято 18.12.2019 р.

УДК 69.055: 69.003

ОПТИМІЗАЦІЯ ТРИВАЛОСТІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ГРОМАДСЬКОЇ БУДІВЛІ ЗА ФІНАНСОВИХ І ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Д-р техн. наук О. І. Менеїлюк, кандидати техн. наук І. О. Менеїлюк, О. Л. Нікіфоров, студент О. Л. Свєрдленко

OPTIMIZATION OF THE DURATION OF RECONSTRUCTION OF A PUBLIC BUILDING WITH FINANCIAL AND ORGANIZATIONAL LIMITATIONS

D. Sc. (Tech.) O. Meneilyuk, PhD (Tech.) I. Meneilyuk, PhD (Tech.) O. Nikiforov, student O. Sverdlenko

Анотація. Сучасна практика архітектурного проектування і будівництва будівель більшою мірою пов'язана з реконструкцією існуючого фонду і модернізацією різних споруд. Так, реконструкція є магістральним напрямом у галузі будівництва. На підприємствах при технічному розвитку виникають і накопичуються з часом невідповідності між будівельними рішеннями минулих років і потребами сьогодення. У підсумку необхідна

реконструкція будівлі. Проведення таких робіт виконується, як правило, в умовах стисненого міського простору, при обмеженні можливих організаційних режимів робіт і фінансових лімітах. Це потребує прийняття специфічних організаційних рішень в умовах обмежень, методи розроблення яких не описані в нормативній і довідковій літературі. Мета: пошук оптимальних значень тривалості реконструкції громадської будівлі при обмеженнях за інтенсивністю фінансування і кількістю робочих годин на тиждень шляхом експериментально статистичного моделювання. У роботі проведено аналіз інформаційних джерел за напрямками встановлення рівня актуальності, обґрунтування апріорних положень дослідження. Визначено показники та фактори, що є найбільш значущими для громадської будівлі, реконструкція якої розглядається. Проведено чисельний експеримент із використанням програмного забезпечення з управління проектами (Microsoft Project) і кореляційно-регресійного аналізу (COMPEX). Знайдено закономірності зміни тривалості та інтенсивності фінансування реконструкції під впливом кількості робочих годин на тиждень і коефіцієнта суміщення робіт. Графічно знайдено найменше значення тривалості реконструкції при обмеженнях за кількістю робочих годин та інтенсивності фінансування, що є найбільш характерними для громадської будівлі, реконструкція якої моделюється. Експериментально-статистичне моделювання дозволяє оптимізувати тривалість реконструкції при впливі діючих обмежень в умовах варіювання організаційних факторів.

Ключові слова: реконструкція будівлі, будівельні рішення, тривалість, інтенсивність фінансування, фактори.

Abstract. The modern practice of architectural design and construction of buildings is more associated with the reconstruction of the existing fund and the modernization of various structures. So, reconstruction is the main direction in the field of construction. In enterprises with technical development, discrepancies arise between the construction decisions of past years and the needs of the present with the accumulation of time. As a result, reconstruction of the building is necessary. Such work is carried out, as a rule, in a compressed urban space, while limiting the possible organizational modes of work and financial limits. This requires the adoption of specific organizational decisions in the face of restrictions, the development methods of which are not described in the normative and reference literature. Goal is to search for optimal values for the duration of the reconstruction of a public building with restrictions on the intensity of financing and the number of working hours per week, through experimental-statistical modeling. The paper analyzes information sources in the areas of establishing the level of relevance, substantiating the a priori provisions of the study. The indicators and factors that are most significant for the public building, the reconstruction of which is considered, are determined. Conducted a numerical experiment using project management software (Microsoft Project) and correlation and regression analysis (COMPEX). Found patterns of change in the duration and intensity of reconstruction financing under the influence of the number of working hours per week and the coefficient of combination of works. Graphically, the smallest value of the duration of the reconstruction was found with restrictions on the number of working hours and the intensity of financing, which are the most characteristic for the public building, the reconstruction of which is modeled. Experimental-statistical modeling allows you to optimize the duration of the reconstruction under the influence of existing restrictions in the context of varying organizational factors.

Keywords: reconstruction of the building, construction decisions, duration, funding intensity, factors.

Вступ. Невідповідність будівель, побудованих за часів СРСР, сьогоdnішнім

вимогам, а також істотний технічний прогрес, реформування економіки і перехід

до ринкових принципів оцінювання ефективності призводять до необхідності зміни їхнього цільового та функціонального призначення.

Технічний стан багатьох промислових і цивільних будівель в Україні дозволяє експлуатувати їх ще не одне десятиліття. Більшість з них знаходиться всередині територій населених пунктів. Реконструкція порівняно з новим будівництвом дозволяє не тільки отримати нові об'єкти в межах міста, але і знизити вартість будівельних робіт. Тема дослідження є надзвичайно актуальною, враховуючи високий соціальний, економічний і технічний ефект вирішення проблеми вибору раціональних організаційних рішень при реконструкції в умовах перепрофілювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до досліджень серед факторів, що мають найбільший вплив на процес реконструкції житлових комплексів, найбільш значущими є суміщеність робіт і варіативність кількості робочих годин на тиждень [4]. Дослідники виділяють такі основні показники реконструкції будівель: тривалість і інтенсивність фінансування [3, 7]. З огляду на те, що як будівництво, так і реконструкція проводяться в нестабільних фінансово-економічних умовах [2, 8], важливим є дослідити вплив організаційних режимів реконструкції на ці показники.

Аналіз робіт, присвячених оптимізації організаційно-технологічних рішень будівництва і реконструкції [4, 5, 10], дозволяє зробити висновок, що застосування експериментально-статистичного моделювання є ефективним способом вирішення подібних завдань і може бути використано при моделюванні та оптимізації операційної діяльності підприємств з будівництва і реконструкції будівель. Незважаючи на те, що деякі оптимізаційні дослідження дозволяють знайти раціональні рішення підприємств при застосуванні аналізу мережевих моделей [14], їх використання є занадто

трудомістким. Альтернативні методи (у тому числі мережі Петрі, нечіткі методи оптимізації даних) не можуть бути використані для низького числа точок експерименту [15, 16], тому для чисельного моделювання процесів будівельного виробництва вибрано моделювання у програмі MS Project. Методикам оптимізації при застосуванні експериментально-статистичного моделювання присвячені роботи [1, 6, 9, 11–13].

Визначення мети та завдання дослідження. Розробити методіку, присвячену вибору ефективних моделей організації реконструкції будівлі, найбільш ефективну в умовах організаційних обмежень. Для досягнення зазначеної мети вирішено такі завдання:

1. Аналіз інформаційних джерел з теми дослідження.
2. Вибір найбільш значущих показників і факторів, планування чисельного експерименту.
3. Експериментально-статистичне моделювання реконструкції громадської будівлі і введення організаційно-фінансових обмежень у закономірності зміни тривалості реконструкції.
4. Пошук оптимальних рішень в умовах обмежень.

Основна частина дослідження. Для побудови математичної моделі необхідно визначити найбільш значущі показники для вибору ефективної моделі реконструкції будівлі, що дадуть оцінку ефективності фінансових і організаційних рішень.

Найбільш значущими показниками ефективності при реконструкції будівлі обрано такі:

- Y_1 – тривалість реконструкції – визначається за критичним шляхом складеного календарного графіка виконання робіт;
- Y_2 – інтенсивність фінансування реконструкції – визначає, яка сума необхідна для проведення робіт на місяць.

На обрані показники найбільший вплив мають такі фактори:

– X_1 – кількість робочих годин на тиждень – при розробленні плану експерименту було обрано 40, 72, 112 робочих годин на тиждень;

– X_2 – коефіцієнт суміщення робіт – відношення сумарної довжини періодів суміщення між парами попередніх і наступних робіт до сумарної тривалості всіх процесів на всіх захватках:

$$X_2 = \frac{\sum t_{\text{совм.}}}{\sum t_{\text{прод.}}} * 100\% = \frac{\sum t_{\text{прод.}} - t_{\text{оконч.}}}{\sum t_{\text{прод.}}} * 100\%, \quad (1)$$

де $\sum t_{\text{совм.}}$ – сумарний резерв часу, що вивільняється, у результаті поєднання робіт у часі;

$\sum t_{\text{прод.}}$ – сумарна тривалість всіх процесів на всіх захватках;

$t_{\text{оконч.}}$ – тривалість комплексу будівельних робіт, отримана в результаті суміщення робіт між собою.

Рівні варіювання всіх факторів, що впливають на ефективність проведення реконструкції, були прийняті відповідно до теорії планування експерименту, яка передбачає, що варійовані фактори мають знаходитися в діапазоні -1; 0; +1. При цьому X_i , що позначається як -1, відповідає мінімальному значенню фактора, X_i , що позначається +1, – максимальному значенню, а X_i , що позначається 0, – середнє значення факторів. Фактори і рівні їх варіювання наведені в табл. 1.

Експериментальне статистичне моделювання процесів проводиться відповідно до теорії планування експериментів, що дозволяє зменшити обсяг робіт і провести експеримент з надійними і достовірними результатами. Для проведення експерименту з двома незалежними факторами був обраний план, кількість дослідів у якому – 9. При розрахунку експериментально-статистичних (ЕС) моделей перехід від

натурних до кодованих змінних виконувався за типовою формулою:

$$X_i = \frac{X_{i \max} - X_{i \min}}{X_{i \max} - X_{i \min}}, \quad (2)$$

де x_i – нормалізоване значення рівня і-го фактора;

$X_{i.}$ – натурне значення рівня і-го фактора;

$X_{i \max}$ – натурне значення максимального рівня і-го фактора;

$X_{i \min}$ – натурне значення мінімального рівня і-го фактора $i = \{1, 2\}$.

Для кількісної оцінки та аналізу залежностей між показниками і впливаючими на них факторами для трифакторних моделей будуються експериментально-статистичні моделі, що являють собою математичні залежності у вигляді поліномів другого ступеня. Далі, після складання базової моделі, для отримання закономірностей впливу факторів на показники ефективності реконструкції виконується чисельний експеримент у програмі Microsoft Project.

Результати виконання чисельного експерименту за 9-точковим планом наведені в табл. 2. У стовпчиках 6-7 табл. 2 подані значення досліджуваних показників ефективності (тривалість реконструкції та інтенсивність фінансування) для кожного поєднання факторів

$$Y_i = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2. \quad (3)$$

Таблиця 1

Фактори і рівні варіювання факторів експерименту

Кількість робочих годин на тиждень X_1 , год		Коефіцієнт суміщення робіт X_2	
-1	40	-1	0
-0,05	72	0	25 %
+1	112	+1	50 %

Таблиця 2

Результати чисельного експерименту

Номер з/п	Кількість робочих годин на тиждень X_1		Коефіцієнт суміщення робіт X_2		Тривалість реконструкції Y_1 , дн.	Інтенсивність фінансування реконструкції Y_2 , тис. умов. од./міс.
	-1	40	-1,0	0,00		
1	-1	40	-1,0	0,00	843,34	69,11
2	-0,05	72	-1,0	0,00	418,23	127,42
3	1	112	-1,0	0,00	313,67	165,97
4	-1	40	0,0	25,00	627,35	88,86
5	-0,05	72	0,0	25,00	312,47	166,56
6	1	112	0,0	25,00	151,5	331,05
7	-1	40	1,0	50,00	558	98,44
8	-0,05	72	1,0	50,00	158	317,91
9	1	112	1,0	50,00	102	486,00

Виявлені при виконанні чисельного експерименту закономірності дозволяють, змінюючи кількість робочих годин на тиждень і коефіцієнт суміщення робіт, вибирати найбільш ефективну модель реалізації проекту реконструкції. Результати моделювання на прикладі реального об'єкта реконструкції показали, що при зміні досліджуваних факторів основні показники ефективності можуть змінюватися в дуже широких межах:

– тривалість реконструкції – від 102 до 843,34 дн.;

– інтенсивність фінансування реконструкції – від 69,11 тис. умов. од./міс. до 486 тис. умов. од./міс.

Експериментально-статистичні моделі тривалості та інтенсивності фінансування

наведені нижче. Для моделі тривалості коефіцієнт детермінації становить 0,9926, похибка апроксимації – 21,6339; для моделі інтенсивності фінансування коефіцієнт детермінації становить 0,9861, похибка апроксимації – 15,3299.

Інвестором були задані такі обмеження:

– за рівнем фактора $X_1 \leq 72$ год ($X_1 \leq -0,05$). Таке обмеження було введено через важкість умов реконструкції, що не дозволяло проводити роботи більшу кількість годин на тиждень;

– за значенням показника $Y_2 \leq 300$ тис. умов. од. Таке обмеження було введено через неспроможність надавати більше коштів на реконструкцію.

$$Y_1 = 244,04 - 243,587X_1 + 165,203X_1^2 + 18,558X_1X_2 - 125,526X_2 + 35,1X_2^2, \quad (4)$$

$$Y_2 = 207,204 + 121,102X_1 - 10,844X_1^2 + 72,094X_1X_2 + 92,618X_2 + 15,318X_2^2. \quad (5)$$

Знайдемо координати точок, у яких показник набуває значення $Y_2 = 300$ тис. умов. од./міс. Такими точками є $(X_1 = -0,053; X_2 = 1)$ і $(X_1 = 1; X_2 = -0,15)$. Відповідні значення тривалості для даних точок дорівнюють $Y_{1min1} = 166$ дн. ($X_1 = -0,053; X_2 = 1$) і $Y_{1min2} = 183$ дн. ($X_1 = 1; X_2 = -0,15$). Мінімальне значення тривалості

при заданих обмеженнях одне: $Y_{1min} = 166$ дн. ($X_1 = -0,053; X_2 = 1$).

Таким чином мінімальна тривалість реконструкції при обмеженні по $X_1 \leq 72$ год та $Y_2 \leq 300$ тис. умов. од. становить $Y_1 = 166$ дн. ($X_1 = -0,053; X_2 = 1$).

Закономірність показника «тривалість реконструкції» при даних обмеженнях зображено на рисунку.

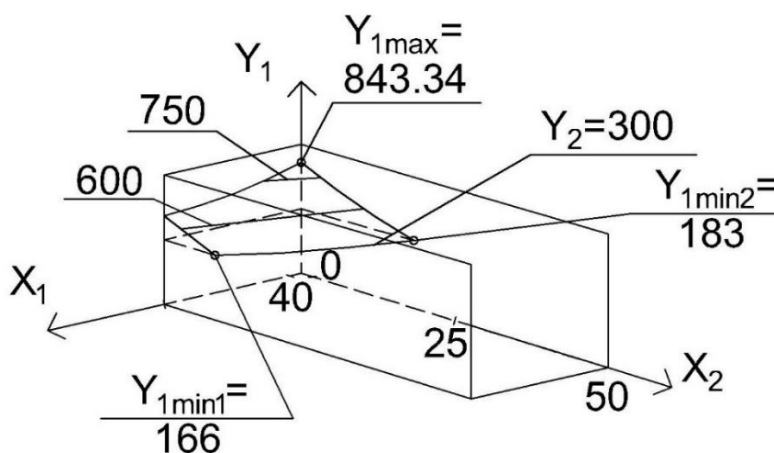


Рис. Закономірність зміни показника «тривалість у днях» Y_1 від факторів «кількість робочих годин на тиждень» X_1 і «коефіцієнта суміщення робіт» X_2 при обмеженнях $X_1 \leq 72$ год та $Y_2 \leq 300$ тис. умов. од.

Висновки

1. Аналіз інформаційних джерел показав високу актуальність проведеного дослідження та дозволив обґрунтувати апріорні положення.

2. Запропонований у статті підхід дозволяє розрахувати оптимальні значення тривалості реконструкції громадської будівлі і може використовуватися для інших проектів будівництва житлового комплексу.

3. Побудовані експериментально-статистичні залежності від кількості

робочих годин на тиждень і коефіцієнта суміщення робіт реконструкції дозволили ввести обмеження і визначити найефективніший варіант організації реконструкції.

4. Мінімальна тривалість реконструкції розглянутого цивільного будинку становить 166 дн. при обмеженнях за кількістю робочих годин на тиждень не більше 72 год та за інтенсивністю фінансування – не більше 300 тис. умов. од.

Список використаних джерел

1. Задгенидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. Москва: Наука, 1976. 390 с.

2. Ковтун М. В. Становлення та розвиток ринку житла України в умовах ринкових перетворень. Науковий вісник Ужгородського університету. 2014. № 1. С. 282–286.
3. Кравчуновська Т. С., Броневицький С. П. Розвиток будівництва доступного житла з урахуванням концепції стійкого розвитку міст. Сборник научных трудов: Строительство, материаловедение, машиностроение. 2015. № 82. С. 104–110.
4. Лобакова Л. В. Організаційне моделювання реконструкції будівель при їх перепрофілюванні : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08. Одеса, 2016. 21 с.
5. Менейлюк А. И., Ершов М. Н., Никифоров А. Л., Менейлюк И. А. Оптимизация организационно-технологических решений реконструкции высотных инженерных сооружений. Киев: ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2016. 332 с.
6. Налимов В. В., Голикова Т. И. Логические основания планирования эксперимента. Москва: Металлургия, 1980. 152 с.
7. Нечепуренко Д. С. Систематизація організаційно-технологічних факторів, які впливають на тривалість та вартість реалізації енергозберігаючих проектів комплексної реконструкції житлової забудови. Строительство, материаловедение, машиностроение. 2014. № 120. С. 120–126.
8. Сафонов Ю. М., Євтєєва В. Г. Про механізми залучення та джерела фінансування інвестицій у будівництво житла в Україні. Інвестиції: практика та досвід. 2013. № 16. С. 18–21.
9. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В. З. Бродский, Л. И. Бродский, Т. И. Голикова и др. Москва: Металлургия, 1982. 752 с.
10. Чернов І. С. Вибір ефективних моделей зведення житлових будівель при фінансовій ситуації, що змінюється : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08. Одеса, 2013. 20 с.
11. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов / пер. с англ. И. Л. Романовской и А. П. Ху-су, под ред. Ю. В. Линника. Москва: Наука, 1970. 281 с.
12. Kumar R., Vrat P. Using computer models in corporate planning. *Long Range Plann.* 1989. Т. 22. № 2. Р. 114–120. URL: [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(89\)90130-1](https://doi.org/10.1016/0024-6301(89)90130-1).
13. Kempthorne O. The Design and Analysis of Experiments. Oscar Kempthorne. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1952. 534 p. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1952.tb02500.x>.
14. Ma T., Guo J. Study on information transmission model of enterprise informal organizations based on the hypernetwork. *Chinese J. Phys.* 2018. Т. 56. № 5. Р. 2424–2438.
15. Martinez-Araiza U., López-Mellado E. CTL Model Repair for Inter-organizational Business Processes Modelled as oWFN. *IFAC-PapersOnLine.* 2016. Т. 49. № 2. Р. 6–11.
16. Ricciardi F., Zardini A., Rossignoli C. Organizational dynamism and adaptive business model innovation: The triple paradox configuration. *J. Bus. Res.* 2016. Т. 69. № 11. Р. 5487–5493.

Менейлюк Олександр Іванович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельного виробництва Одеської державної академії будівництва і архітектури. ORCID iD: 0000-0002-1007-309X.

Тел.: (048) 729-85-09. E-mail: meneilyk@gmail.com.

Менейлюк Іван Олександрович, кандидат технічних наук, докторант кафедри технології будівельного виробництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0001-7075-2898. Тел.: (057) 7-000-240. E-mail: meneyiv@gmail.com.

Нікіфоров Олексій Леонідович, кандидат технічних наук, асистент кафедри технології будівельного виробництва Одеської державної академії будівництва і архітектури. ORCID iD: 0000-0001-7002-7055.

Тел.: (048) 729-85-09. E-mail: nikiforov.aleksey@yahoo.com.

Свердленко Олексій Леонідович, студент кафедри технології будівельного виробництва Одеської державної академії будівництва і архітектури. Тел.: (048) 729-85-09. E-mail: lea.sverlo@gmail.com.

Meneiliuk Oleksandr, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Chairman of Department of Technology of Building Industry of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-1007-309X. Tel.: (048) 729-85-09. E-mail: meneilyk@gmail.com.

Meneiliuk Ivan, Candidate of Engineering Sciences, Doctoral student of Department of Technology of Building Industry of Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0001-7075-2898. Tel.: (057) 7-000-240. E-mail: meneyiv@gmail.com.

Nikiforov Oleksii, Candidate of Engineering Sciences, assistant of Department of Technology of Building Industry of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0001-7002-7055. Tel.: (066) 33-09-054. E-mail: nikiforov.aleksey@yahoo.com.

Sverdenko Oleksii, student of Department of Technology of Building Industry of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Tel.: (048) 729-85-09. E-mail: lea.sverlo@gmail.com.

Статтю прийнято 20.12.2019 р.

УДК 624.012:624.078.004.15

ІМОВІРНІСНЕ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ПАСИВНИХ АНКЕРІВ

Доктори техн. наук О. П. Воскобійник, А. О. Мозговий

PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF PASSIVE ANCHORS

D. Sc. (Tech.) O.P. Voskobiinyk, D. Sc. (Tech.) A.O. Mozgovuy

***Анотація.** Запровадження імовірнісних методів оцінювання надійності будівельних конструкцій регламентовано сучасними нормами проектування. Під час зведення об'єктів будівництва постає завдання конструювання вузлів будівельних конструкцій із застосуванням пасивних анкерів. Дана робота націлена на побудову й апробацію алгоритму імовірнісного оцінювання пасивних анкерів, що обумовлює її актуальність. Завданням роботи є розроблення алгоритму імовірнісного оцінювання надійності пасивних анкерів за критеріями втрати надійності, які є можливими під час експлуатації системи анкер-бетон, з урахуванням випадкового характеру властивостей матеріалів і навантаження.*

***Ключові слова:** анкер, бетон, випадкова величина, імовірнісне оцінювання надійності, імовірність настання граничного стану.*

***Abstract.** The introduction of probabilistic methods for assessing the reliability of building structures is governed by modern design standards. When constructing engineering facilities, the task is to construct the structural elements using passive anchors. This work is aimed at creating and testing an algorithm of probabilistic assessment of passive anchors, which determines its relevance. The work's objective is to develop an algorithm of probabilistic assessment of the reliability of passive anchors by the criteria of loss of reliability, which are possible during the operation of the anchor-concrete system, taking into account the random nature of the material properties and load.*

In creating the algorithm of probabilistic assessment of the anchor reliability, the probabilities of reaching the following boundary conditions were considered: strength of the contact between concrete and anchor reinforcement; concrete bearing strength of the contact between concrete and anchor reinforcement; tensile and shear strength of the steel anchor.

The input deterministic parameters of the algorithm were: basic anchorage length; a cross-sectional area of the anchor; Poisson's ratio of concrete; concrete modulus of elasticity. Random inputs were: axial tensile strength and compression strength; tensile resistance of rebar; axial and shear forces.

The calculation is performed by the method of statistical tests N times. The number of tests, in which the rod is considered unreliable, refers to the total number of tests and determines the risk for the steel anchor of reaching its boundary conditions for its entire service life, followed by calculation of the annual risk for the anchor of reaching its boundary conditions.

According to the results of probabilistic calculations, the risk for the anchor of reaching its boundary conditions for the assigned service life is $P = 1.87 \times 10^{-2} \text{ year}^{-1}$, the annual risk for the anchor of reaching its boundary conditions is $P_r = 3.77 \times 10^{-4} \text{ year}^{-1}$, which does not exceed its permissible value of $P_i^{ex} = 5 \times 10^{-4} \text{ year}^{-1}$, provided for by the design standards for structures of CC2 consequences (responsibility) class for the estimated lifetime of $T_{ef} = 50$ years.

Key words: anchor, concrete, random variable, probability assessment of reliability, probability of reaching boundary conditions.

Вступ. Запровадження імовірнісних методів оцінювання надійності будівельних конструкцій регламентовано сучасними нормами проектування [1]. Під час будівництва або реконструкції об'єктів будівництва постає завдання конструювання вузлів будівельних конструкцій із застосуванням пасивних анкерів. Дана робота націлена на побудову й апробацію алгоритму імовірнісного оцінювання пасивних анкерів, що обумовлює її актуальність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обґрунтування нормативних і розрахункових величин опору на зріз і виривання розпірних анкерів для кріплення елементів зовнішнього утеплення будівель розглянуто в роботі [2]. Експериментальні дослідження сталобетонних плит з різними умовами опору та кроком анкерних упорів виконано в роботі [3]. Питання щодо особливостей розрахунку нерозрізних сталезалізобетонних балок із болтовими анкерами, забезпечення сумісної роботи бетону і сталі в сталезалізобетонних конструкціях при забезпеченні їх анкерування у прогоні, роботи болтових опорних анкерів і їхньої ефективності у монолітних плитах розглянуто в роботах [4–10], а також відображено в закордонних роботах [11, 12]. У роботі [13] розглянуто багатомасштабну модель і здійснено

чисельне моделювання витягування анкерного болта з легкого бетону. Моделі щодо прогнозування опорних опорів анкерних болтів розглянуто в роботі [14].

Не вирішеною раніше частиною проблеми є відсутність алгоритму імовірнісного оцінювання системи анкер–бетон, що враховує випадкові характеристики матеріалів і зовнішніх навантажень.

Визначення мети та завдання дослідження. Завданням роботи є розроблення алгоритму імовірнісного оцінювання надійності пасивних анкерів за критеріями втрати надійності, що є можливими під час експлуатації системи анкер–бетон. Метою роботи є розроблення і апробація алгоритму на чисельному прикладі оцінювання імовірнісної надійності системи анкер–бетон.

Основна частина дослідження. Оцінювання надійності анкера за детерміністичною методикою. Згідно з механічними властивостями замурування анкера, за термінологією роботи [15], розглядаються розподілені анкери або анкери періодичного профілю, несуча здатність яких забезпечена зчепленням з бетоном по бічній поверхні. За напрямком розташування в тілі бетону розглядаються нормальні анкери.

Основні стадії роботи анкера висвітлено в роботі [15]. Пружна стадія має

місце, коли стискальні напруження в бетоні менші за міцність бетону на стиск. Наступна стадія супроводжується розвитком непружних деформацій до появи головних тріщин у бетоні. Подальша стадія характеризується появою головних тріщин у бетоні. Остання стадія характеризується розвитком непружних деформацій після появи головних тріщин і руйнуванням бетону навколо зони контакту з анкером.

У даній роботі процеси розвитку непружних деформацій, появи головних тріщин і руйнування бетону навколо зони контакту з анкером не розглядаються, а критеріями руйнування системи анкер-бетон є досягнення будь-якого з граничних станів, розглянутих нижче (рис. 1).

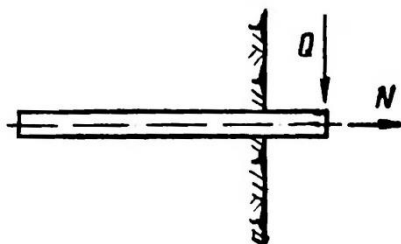


Рис. 1. Розрахункова схема анкера

Міцність по контакту бетон-арматура анкера і визначення необхідної довжини анкерування. При дії осьової сили відриву N по контакту розчин – арматура анкера виникають сили зчеплення або дотичні напруження [16], розподіл яких за довжиною анкерування стрижня є нерівномірним. Граничні напруження зчеплення мають бути достатніми для запобігання руйнуванню зчеплення. Розрахункове значення граничних напружень зчеплення f_{bd} для стрижнів періодичного профілю визначається за формулою [17]

$$f_{bd} = 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}, \quad (1)$$

де η_1 – коефіцієнт, пов'язаний з якістю зчеплення і розміщення стрижня під час бетонування;

η_2 – коефіцієнт, пов'язаний із діаметром стрижня;

f_{ctd} – розрахункове значення міцності бетону на розтяг,

$$f_{ctd} = \frac{\alpha_{ct} \cdot f_{ctk,0.05}}{\gamma_c}, \quad (2)$$

де α_{ct} – коефіцієнт, що враховує вплив на міцність при розтягу тривалості впливів і несприятливих впливів, викликаних способом прикладання навантаження;

$f_{ctk,0.05}$ – характеристична міцність бетону на осьовий розтяг;

γ_c – коефіцієнт надійності для бетону, $\gamma_c = 1.0$ [16, 17].

Для бетону класу міцності С30/35 характеристична міцність бетону на осьовий розтяг $f_{ctk,0.05} = 2.0$ МПа [16]. Розрахункове значення міцності бетону на розтяг f_{ctd} , обчислене за формулою (2) при $\alpha_{ct} = 1$ [17] і $\gamma_c = 1.0$ [16, 17], дорівнюватиме $f_{ctd} = 2.0$ МПа.

Розрахункове значення граничних напружень зчеплення f_{bd} для стрижня періодичного профілю при $\eta_1 = 1$ [17] і $\eta_2 = 1$ [17], обчислене за формулою (1), дорівнюватиме $f_{bd} = 4.5$ МПа [16].

Необхідна основна довжина анкерування $l_{b,rqd}$ для заанкерування зусилля $A_s \sigma_{sd}$ у прямих стрижнях передбачає постійне зчеплення, значення якого дорівнює f_{bd}

$$l_{b,rqd} = \left(\frac{d}{4}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}\right), \quad (3)$$

де d – діаметр арматурного стрижня;

σ_{sd} – розрахункові напруження у стрижні в місці, від якого визначається анкерування.

Для арматурного прокату класу А400С із номінальним діаметром $d_H = 20$ мм, розрахунковим діаметром $d = 18.5$ мм, із розрахунковою площею поперечного перерізу $A_s = 268.67$ мм² [18] при дії осьової сили $N = 72.5$ кН розрахункові напруження у стрижні дорівнюватимуть $\sigma_{sd} = 270$ МПа.

Необхідна основна довжина анкерування $l_{b,rqd}$ для заанкерування зусилля $A_s \sigma_{sd}$ у прямому стрижні, обчисленому за формулою (3), становитиме $l_{b,rqd} = 277.5$ мм.

Перевірка міцності бетону по контакту бетон-арматура анкера на зминання. При розрахунку міцності бетону, що оточує анкер за умови вичерпання міцності на зминання при дії перерізуючої сили Q , можна вважати розподіл напружень у зоні контакту анкер-бетон при закріпленні анкера таким, що підпорядковується умові деформування стрижня перерізуючою силою у пружному напівпросторі [19]. Нормальні напруження в зоні контакту анкер-бетон залежать від відношення довжини стрижня в межах пружного середовища h [19] (у даному випадку основна довжина анкерування $l_{b,rqd}$) до ширини стрижня (напівпериметра арматурного стрижня), а також коефіцієнта β , який визначається за формулою

$$\beta = \frac{1-\nu}{(1+\nu) \cdot (3-4 \cdot \nu)} \left(\frac{E_{cd} \cdot h^4}{E \cdot I} \right), \quad (4)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона бетону, $\nu = 0.2$ [16];

E_{cd} – розрахункове значення модуля пружності бетону, $E_{cd} = 27$ ГПа;

EI – жорсткість арматурного стрижня.

При використанні результатів розрахунків за графіками, наведеними в роботі [19] у розд. VII (рис. 47–50), стає очевидним, що вони побудовані для значень параметра β від 0 до 1000. Зауважимо, що при великих значеннях β віддалена від вільного кінця частина стрижня не працює, а напруження в контактній зоні близькі до нуля. Якщо стрижень є суттєво гнучким, а коефіцієнт β буде мати значення більше 1000, рекомендовано ввести до розрахунку лише частину довжини стрижня, скоротивши його довжину h настільки, щоб β не перевищувало 1000.

З метою встановлення довжини частини стрижня в зоні контакту анкер-бетон, яка включається в роботу при навантаженні в умовах деформування стрижня перерізуючою силою у пружному напівпросторі були виконані систематичні чисельні розрахунки щодо оцінювання їхнього напружено-деформованого стану. Аналіз результатів розрахунків засвідчив, що при довжині анкерування стрижня $l_{b,rqd} = 277.5$ мм нормальні напруження в зоні контакту анкер-бетон розповсюджуються на глибину 70 мм, окрім того, ця глибина не залежить від величини перерізуючої сили. Скоротивши довжину стрижня h до 70 мм, отримаємо параметр $\beta = 160$. При відношенні довжини стрижня $h = 70$ мм до його ширини $b = 18.5$ мм $h/b = 3.8$ для побудови епюри нормальних напружень у зоні контакту анкер-бетон (див. рис. 47 [19]).

Епюру нормальних напружень будемо за формулою

$$\sigma_x = \frac{X \cdot Q}{b \cdot h}, \quad (5)$$

де X – ордината епюри напружень (рис. 47 [4]).

При цьому h відраховується від вільного кінця стрижня. Значення X залежно від h наведені в таблиці.

При дії перерізуючої сили $Q = 6.0$ кН максимальні нормальні стискальні напруження, визначені за формулою (5), при $h = 0$ м дорівнюють $\sigma_x = 26.19$ МПа.

Головні напруження в бетоні, що оточує анкер, в умовах складного одновісного напруженого стану визначаються за формулами

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2}, \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2}, \quad (7)$$

де σ_1, σ_2 – головні напруження в бетоні;
 σ_x – нормальні напруження в бетоні, які виникають унаслідок дії перерізуючої сили Q ;

τ_{xy} – дотичні напруження в бетоні, які виникають унаслідок дії осьової сили відриву N (рис. 1.42 [20]).

Таблиця

Відстань від вільного кінця стрижня	Параметр β	Ордината епюри напружень X
0	160	+9.1
0.1 · h		+4.8
0.2 · h		+2.1
0.3 · h		+0.9
0.4 · h		+0.1
0.5 · h		-0.3
0.6 · h		-0.2
0.7 · h		-0.1
0.8 · h		-0.05
0.9 · h		-0.1
h		-0.15

При розрахунку міцності бетону, що оточує анкер за умовою вичерпання міцності на зминання, має виконуватись умова $\sigma_{max} \leq f_{cd,loc}$ (аналог $R_{b,loc}$), де $f_{cd,loc}$ – розрахунковий опір бетону зминанню, який визначається за формулою [21]

$$f_{cd,loc} = \alpha \cdot \varphi_b \cdot f_{cd}, \quad \alpha \cdot \varphi_b \geq 1, \quad (8)$$

де f_{cd} – розрахункове значення міцності бетону на стиск;

$\alpha = 13.5 \cdot f_{ctd} / f_{cd}$ – для бетону класу C20/25 і вище;

$\varphi_b = 1.0$ (кресл. 63, б [21]).

Для бетону класу міцності C30/35 f_{cd} – розрахункове значення міцності бетону на стиск $f_{cd} = 19.5$ МПа [16]. Розрахункове значення міцності бетону на розтяг $f_{ctd} = 2.0$ МПа. Розрахунковий опір бетону зминанню, визначений за формулою (8), дорівнюватиме $f_{cd,loc} = 27.0$ МПа. Умова вичерпання міцності бетону, що оточує анкер, на зминання виконується: $\sigma_{max} = \sigma_1 = 26.19$ МПа $\leq f_{cd,loc} = 27.0$ МПа.

Міцність сталевого анкера на розтяг і зріз. При одночасній дії на анкер осьової сили відриву N і перерізуючої сили Q у загальному випадку має виконуватись умова міцності сталевого анкера в умовах складного напруженого стану [22]

$$R_y \geq \frac{0.87 \cdot \gamma_n}{\gamma_c} \cdot \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}, \quad (9)$$

де R_y – розрахунковий опір сталі розтягу;

γ_n – коефіцієнт надійності за відповідальністю;

γ_c – коефіцієнт умов роботи;

σ_x, σ_y – нормальні напруження в небезпечному перерізі анкера;

τ_{xy} – дотичні напруження в небезпечному перерізі анкера.

При дії перерізуючої сили $Q = 54$ кН у небезпечному перерізі анкера виникають дотичні напруження $\tau_{xy} = 201.0$ МПа.

За роботою [18], для арматурного прокату класу А400С розрахунковий опір сталі розтягу $R_y = 400$ МПа, при $\gamma_n = 1.0$, $\gamma_c = 1.0$ нерівність (9) виконується: $R_y = 400$ МПа $>$ 383.2 МПа.

Імовірнісне оцінювання надійності анкера. Вхідні детерміністичні параметри прийнято такі: основна довжина анкерування $l_{b,rqd} = 277.5$ мм; площа поперечного перерізу анкера $A_s = 268.67$ мм²; площа напівпериметра анкера $A = 8060$ мм²; осьовий момент опору анкера $W = 372838.6$ мм³; ν – коефіцієнт Пуассона бетону, $\nu = 0.2$ [2]; E_{cd} – розрахункове значення модуля пружності бетону, $E_{cd} = 27$ ГПа.

Випадковими вхідними величинами прийнято:

– міцність бетону класу міцності С30/35 на осьовий розтяг f_{ct} – за нормальним розподілом із математичним очікуванням $m_{f_{ct}} = 2.8$ МПа і коефіцієнтом варіації $C_{f_{ct}} = 0.172$ [16];

– міцність бетону класу міцності С30/35 на стиск f_{cd} – за нормальним розподілом із математичним очікуванням $m_{f_{cd}} = 25.0$ МПа і коефіцієнтом варіації $C_{f_{cd}} = 0.135$ [16];

– опір арматурного прокату класу А400С розтягу R_y за нормальним розподілом із математичним очікуванням $m_{R_y} = 480.0$ МПа і коефіцієнтом варіації $C_{R_y} = 0.1$ [16];

– випадкова величина осьової сили N – за нормальним розподілом із математичним очікуванням $m_N = 54.55$ кН (розрахункове

значення 95 % забезпеченості складає $N_p = 72.5$ кН) і коефіцієнтом варіації $C_N = 0.2$;

– випадкова величина перерізуючої сили Q – за нормальним розподілом із математичним очікуванням $m_Q = 4.52$ кН (розрахункове значення 95 % забезпеченості складає $Q_p = 6.0$ кН) і коефіцієнтом варіації $C_Q = 0.2$.

При проведенні кожного статистичного випробування використовується такий алгоритм.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність pf_{ct} випадкової величини міцності бетону на осьовий розтяг. За значенням pf_{ct} визначається квантиль – випадкова величина міцності бетону на осьовий розтяг f_{ct} .

Імовірність pf_{cd} випадкової величини міцності бетону на стиск задається випадковою, розподіленою від 0 до 1. За значенням pf_{cd} визначається квантиль – випадкова величина міцності бетону на стиск f_{cd} .

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність pR_y випадкової величини опору арматурного прокату розтягу. За значенням pR_y визначається квантиль – випадкова величина опору арматурного прокату розтягу R_y .

Імовірність pN випадкової величини осьової сили задається випадковою, розподіленою від 0 до 1. За значенням pN визначається квантиль – випадкова величина осьової сили N .

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність pQ випадкової величини перерізуючої сили. За значенням pQ визначається квантиль – випадкова величина перерізуючої сили Q .

За відомим значенням випадкової величини міцності бетону на осьовий розтяг f_{ct} за формулою (1) визначається випадкова величина граничних напружень зчеплення f_{bd} .

З використанням відомого значення випадкової величини осьової сили N визначаються напруження у стрижні σ_{sd} від дії осьової сили і за формулою (3)

обчислюється випадкова величина
необхідної довжини анкерування $l_{b,rqd,n}$.

Перевіряється виконання умови

$$l_{b,rqd,n} \leq l_{b,rqd} \quad (10)$$

При невиконанні умови (10) стрижень вважається ненадійним.

За відомим значенням випадкової величини перерізуючої сили Q за формулою (5) знаходимо випадкову величину максимальних нормальних стискальних напружень σ_x у бетоні у зоні контакту анкер-бетон, а за формулами (6), (7) визначаємо випадкові величини головних напружень у бетоні σ_1, σ_2 . За формулою (8) визначається випадкова величина опору

бетону зминанню $f_{cd,loc}$. Перевіряється виконання умови

$$\sigma_{max} \leq f_{cd,loc} \quad (11)$$

При невиконанні умови (11) стрижень вважається ненадійним.

Перевіряється надійність сталевго анкера на розтяг і зріз. Визначаються випадкові величини нормальних σ_x, σ_y і дотичних τ_{xy} напружень у небезпечному перерізі анкера. Перевіряється виконання умови (9) без урахування константи 0.87, коефіцієнтів γ_n і γ_c . При невиконанні умови (9) стрижень вважається ненадійним. Ілюстрація розрахунків за наведеним алгоритмом наведена на рис. 2–4.

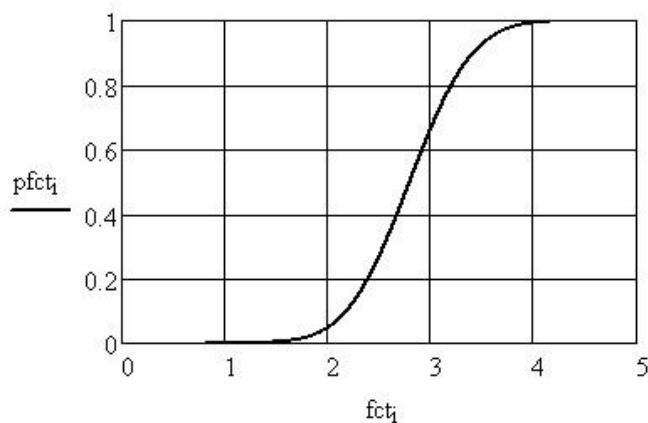


Рис. 2. Імовірнісна крива розподілу характеристичної міцності бетону $f_{ctk,0.05}$, МПа, на осьовий розтяг

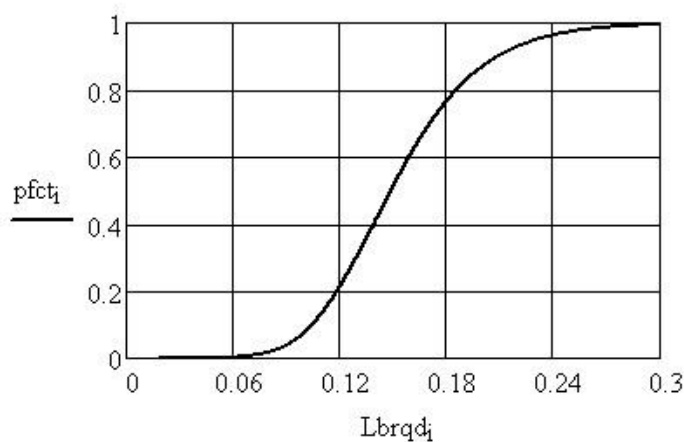


Рис. 3. Імовірнісна крива розподілу необхідної довжини анкерування $l_{b,rqd}$ залежно від імовірності характеристичної міцності бетону $f_{ctk,0.05}$, МПа, на осьовий розтяг

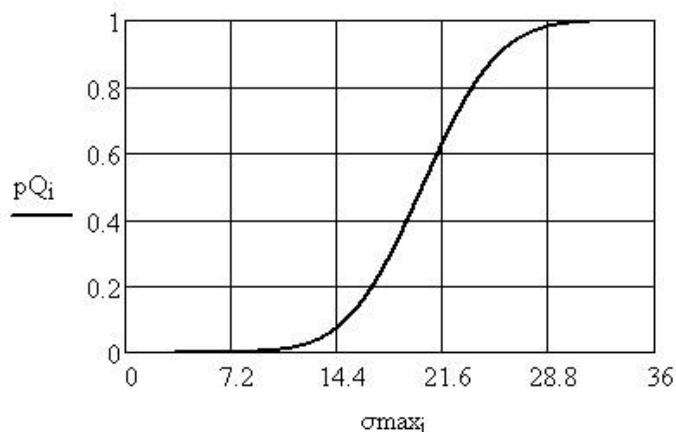


Рис. 4. Імовірнісна крива розподілу максимальних нормальних стискальних напружень σ_{max} , МПа, визначених за формулою (5), залежно від імовірності перерізуючої сили Q

Розрахунок виконується методом статистичних випробовувань N разів. Кількість випробовувань, при яких стрижень вважається ненадійним при невиконанні навіть однієї з умов (9–11), віднесена до загальної кількості випробовувань N , визначає величину ризику настання граничного стану сталевго анкера за весь строк експлуатації. Значення щорічної імовірності ризику досягнення граничного стану анкера обчислюється за формулою

$$p = 1 - (1 - pr)^{\frac{1}{T_{ef}}}, \quad (12)$$

де p – щорічна імовірність настання граничного стану;

pr – імовірність настання граничного стану за призначений строк служби;

T_{ef} – розрахунковий строк експлуатації, роки,

і виконується порівняння із допустимою величиною.

За результатами розрахунків, імовірність настання граничного стану за призначений строк служби $P = 1.87 \times 10^{-2} \text{ рік}^{-1}$, щорічна імовірність настання граничного стану сталевго анкера $P_r = 3.77 \times 10^{-4} \text{ рік}^{-1}$, що не перевищує допустимого значення імовірності настання граничного стану

$P_i^{ex} = 5 \times 10^{-4} \text{ рік}^{-1}$, регламентованого нормами проектування [1] для споруд класу наслідків (відповідальності) СС2 категорії відповідальності конструкції В у перехідних розрахункових ситуаціях за першою групою граничних станів для розрахункового строку експлуатації $T_{ef} = 50$ років.

Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться в межах довірчого інтервалу. Межі довірчого інтервалу обчислені за формулами роботи [23].

Аналіз результатів. Під час виконання розрахунків встановлено, що найбільший вплив на інтегральну надійність сталевго анкера має імовірність руйнування за критерієм забезпечення необхідної довжини анкерування, а також за критерієм міцності бетону на зминання.

Висновки. Представлений алгоритм у подальшому може бути удосконалений шляхом уведення до розгляду стадій появи непружних деформацій до появи головних тріщин у бетоні, появи головних тріщин у бетоні і руйнування бетону навколо зони контакту з анкером. Запропонована методика базується на інженерному підході в розрахунках надійності пасивних анкерів і дає змогу оцінити його проектну надійність. Результати можуть застосовуватись при проектуванні і реконструкції об'єктів промислового і цивільного будівництва.

Список використаних джерел

1. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд: ДБН В.1.2–14:2018. Чин. від 2019–01–01. Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2018. 30 с. (Державні будівельні норми України).
2. Губій М. М., Коваленко О. С. Обґрунтування нормативних і розрахункових величин опору на зріз і виривання розпірних анкерів для кріплення елементів зовнішнього утеплення будівель. *Научно-технический сборник. Коммунальное хозяйство городов*. 2007. № 76. С. 123–128.
3. Петрушевська А. А., Ігнатенко Є. В. Експериментальні дослідження квадратних сталобетонних плит з різними умовами опору та кроком анкерних упорів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2014. Вип. 148. Ч. 2. С. 192–196.
4. Семко О. В., Гудзь С. А., Дарієнко В. В. Особливості розрахунку нерозрізних сталезалізобетонних балок із болтовими анкерами. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 664: Теорія і практика будівництва. С. 208–215.
5. Кобзева Е. Н., Ігнатенко А. В. Расчет сталобетонных балок по несущей способности, исключаяющей работу растянутой зоны бетона. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2012. № 58. С. 119–123.
6. Лапенко О. І. Проблема забезпечення сумісної роботи бетону і сталі в сталезалізобетонних конструкціях. *Містобудування та територіальне планування*. 2013. № 48. С. 255–260.
7. Колякова В. М., Шармаков Є. Л. Особливості роботи сталезалізобетонних прольотних конструкцій при забезпеченні їх анкерування у прольоті. *Наукові нотатки*. 2014. № 46. С. 280–285.
8. Коваль М. П., Кондрюкова І. О. Дослідження роботи монолітних залізобетонних плит зі сталевим профільованим настилом Н80А та болтовими опорними анкерами при дії статичного й високорівневого малоциклового навантаження. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка*. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво. 2015. № 1. С. 169–177.
9. Коваль М. Р. Ефективність опорного анкерування болтовими з'єднаннями сталевого профільованого настилу у монолітних плитах. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2016. № 10. С. 43–50.
10. Semko O. V., Gasenko A. V., Darienko V. V. Determination of the bearing capacity of reinforced concrete uneven beams with flexible anchors. *Construction, materials science, mechanical engineering*. 2018. № 50. P. 510–515.
11. Täljsten B. Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1997. Т. 17. № 4. P. 319–327.
12. Cui Y. Shear behavior of exposed column base connections. *Steel and Composite Structures*. 2016. Т. 21. № 2. P. 357–371.
13. Greco F., Leonetti L., Luciano R. A multiscale model for the numerical simulation of the anchor bolt pull-out test in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2015. Т. 95. P. 860–874.
14. Tong G., Chen R., Zhang L. Models to predict shear resistances of anchor bolts. *Advances in Structural Engineering*. 2017. Т. 20. № 12. P. 1933–1947.
15. Холмянский М. М. Закладные детали сборных железобетонных элементов. Москва: Стройиздат, 1988. 208 с.
16. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6–98:2009. Чин. від 2011–06–01. Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2011. 71 с. (Державні будівельні норми України).
17. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд: (EN 1992-1-1:2004, IDT). ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Чин. від 2013–07–01. Київ: Мінрегіонбуд України, 2012. 311 с. (Національний стандарт України).

18. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови: ДСТУ 3760:2006. Чин. від 2007–10–01. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 28 с. (Національний стандарт України).

19. Жемочкин Б. Н. Расчет упругой заделки стержня. Изгиб стержня в упругом полупространстве. Москва: Стройиздат, 1948. 68 с.

20. Гольшев А. Б., Бачинский В. Я., Полищук В. П. и др. Проектирование железобетонных конструкций: справочное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. Киев: Будивельник, 1990. 544 с.

21. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84) / ЦНИИпромзданий Госстроя СССР. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 192 с.

22. Сталеві конструкції. Норми проектування: ДБН В.2.6–198:2014. Чин. від 2015–01–01. Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2014. 199 с. (Державні будівельні норми України).

23. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. Изд.5-е, стер. Москва: Высшая школа, 1998. 576 с.

Воскобійник Олена Павлівна, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, керівник експертної групи проектування в будівництві Директорату технічного регулювання у будівництві Міністерства розвитку громад та територій України. Тел. (050) 304-40-23. E-mail: elenvosko@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-8547-762X.

Мозговий Андрій Олексійович, доктор технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел. (050) 749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net. ORCID ID: 0000-0002-9142-3169.

Voskobiinyk Olena, Dr. Sc. (Tech), Senior scientific researcher, Expert team of design in construction of the Technical Regulation Directorate in Construction, Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine. Tel. (050) 304-40-23. E-mail: elenvosko@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-8547-762X.

Mozgovuy Andriy, Dr. Sc. (Tech), Associate Professor, Department of Geotechnics, Underground and Hydraulic Structures, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (050) 749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net. ORCID ID: 0000-0002-9142-3169.

Статтю прийнято 10.01.2020 р.

УДК 624.9

ЧИСЕЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ ОДНОГО ПІДХОДУ БІОНІЧНОЇ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ

Д-р техн. наук В. С. Шмуклер, канд. техн. наук О. І. Лугченко, аспірант А. Х. Нажем

NUMERICAL VERIFICATION OF ONE APPROACH OF BIONIC RATIONALIZATION OF STRUCTURES

D. Sc. (Tech.) V. Schmukler, PhD (Tech.) O. Lugchenko, postgraduate student A. Nazhem

***Анотація.** У статті викладена процедура прямого (раціонального) проектування балок. Дана технологія є ексклюзивною модифікацією топологічної (біонічної) оптимізації. У її основі лежать нові енергетичні принципи й алгоритми послідовної побудови геометричного й/або фізико-механічного «образу» конструкції. На прикладі формування енергетично*

рівномірних балок показана послідовність обчислювальних операцій методу. Рішення будується аналітично з метою показування нюансів необхідних операцій. Одночасно на наведених прикладах показано, що введені критерії оптимізації у вигляді $e_n \rightarrow \text{const}$ і $U \rightarrow \inf U$ (тут e_n - значення нормованої щільності потенційної енергії деформацій, а U - потенційна енергія деформацій) зумовлюють у тому числі мінімальний об'єм конструктивів, а також їхні мінімальні прогини. Принциповим елементом підходу є використання нового критерію граничного стану, що забезпечує оцінку напруженості елемента. При цьому враховуються властивості матеріалу й вид напружено-деформованого стану. Отриманий аналітичний розв'язок використано як контрольний тест для загальної обчислювальної процедури методу. У зв'язку з цим у статті наведені результати аналітичного й чисельного розв'язку. Ефективність обчислювальної процедури підтверджена швидкістю її збіжності і мінімальним розходженням геометричних параметрів (топології) конструкції з тест-прикладом. Показано, що сформована результуюча східчаста складна структура балок може бути спрощена за рахунок уніфікації, яка проведена методом динамічного програмування. Технологічна послідовність обчислювальних операцій методу завершена побудовою елементів (балок) із простою зовнішньою й складною внутрішньою геометрією. Доцільність отриманих теоретичних результатів підтверджена шляхом їх впровадження при будівництві різних об'єктів.

Ключові слова: раціональність, щільність потенційної енергії деформації, січний модуль, біонічна оптимізація, енергетичний баланс, ітераційний процес.

Abstract. The paper provides the procedure of forward-engineering (intelligent) beam design. This technology is an exclusive modification of topological (bionic) optimization. It is based on the new energy principles and the algorithms for successive construction of geometric and/or physical-mechanical "pattern" of a structure. The sequence of computational operations of the method in question is illustrated on example of forming beams of energetically uniform strength. The solution is built analytically to show the nuances of the operations required. Simultaneously, the proceeding examples show that the introduced optimization criteria in the form of $e_n \rightarrow \text{const}$ and $U \rightarrow \inf U$ (here, e_n is the value of the normalized potential deformation energy density, and U is the potential deformation energy) cause, including, the minimum volume of constructs, and their minimum deflections. A fundamental element of the given approach is the use of a new criterion for the limit state, which provides an estimate of the element's stress. In this case, the properties of the material and the type of the stress and strain state are taken into account. The analytical solution obtained was used as a checkup test for the general computational procedure of the method in question. In this connection, the paper features the results of analytical and numerical solutions. The efficiency of the computational procedure is confirmed by the rate of its convergence and the minimal variation of geometrical construction parameters (topology) with test cases. It is shown that the resultant stepwise complex beam structure can be simplified through unification, which is carried out by the method of dynamic programming. The technological flow of computational operations of the method in question is completed by the construction of elements (beams) with basic external and complex internal geometry. The feasibility of the theoretical results obtained is confirmed by their implementation in the construction of various projects.

Keywords: rationality, density of potential deformation energy, intersecting modulus, bionic optimization, energy balance, iterative process.

Вступ. Розглядається задача про аналітичне наближене визначення характеру зміни висоти симетрично

завантаженої балки. Розв'язок будується в рамках ідеології, викладеної в роботах [1, 2]. Відносна простота постановки проблеми

жодним чином не звужує загальної процедури, а призначена винятково для одержання розв'язку в кінцевому вигляді. Крім того, застосований підхід є однією з модифікацій нового прогресивного напрямку, названого топологічною (біонічною) оптимізацією, що забезпечує формування конструктивних систем з наперед заданими позитивними властивостями [3, 4]. Позначений алгоритм ґрунтований новими енергетичними принципами, що відрізняє його від згаданих вище результатів і насамперед за рахунок його фізичної прозорості. Важливим також є факт використання запропонованих технологій у робочому проектуванні й зведенні конструкцій, геометрія, а за необхідності й фізичні характеристики яких знайдені розрахунковим, а не інтуїтивним шляхом [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як показує практика, найбільш ефективним методом зниження власної ваги залізобетонних конструкцій є створення в них внутрішніх порожнеч. Традиційно в основному для збірних залізобетонних конструкцій використовують заводську пуансонну технологію, що забезпечує організацію тільки односпрямованих порожнин, обмежених розмірів. При монолітному будівництві з'являється можливість надання порожнинам певної

конфігурації й розмірів. Однак значної різноманітності форм вкладишів порожниноутворювачів, а також їхніх розмірів не спостерігається. Наслідком цієї обставини є виняткове зниження власної ваги конструктиву. Відомі конструктивні системи, такі, наприклад, як Airdeck (США), Bubbledeck (США), Cobiax (ФРН), U-Boot Beton (ФРН) та інші, вирішують саме це завдання. Перераховані технології використовують для вкладишів стандартні розв'язки з застосуванням вторинної пластмаси. У зв'язку із цим вони мають істотні недоліки (у першу чергу високу ціну), що не дозволяє широко використовувати їх у будівельній галузі.

Теоретичною основою при прямому (раціональному) проектуванні конструкцій у машинобудуванні є створені нові SIMP-метод (Solid Isotropic Materials with Penalization) і BESO-метод (Bidirectional Evolutionary Structural Optimization) [3, 4]. Ці методи ґрунтують відомий програмний комплекс ABAQUS [3–5].

Однак істотний додатковий ефект може бути отримано у випадку надання вкладишам обґрунтованої (розрахованої) просторової конфігурації, що визначає раціональну роботу (опір) конструкції. Згадане демонструється інформацією, наведеною в таблиці.

Таблиця

Основні техніко-економічні показники конструкцій полегшених перекриттів
(конструктивна товщина перекриття 25 см)

Назва технології	Характеристика вкладишів				Наведена товщина перекриття	
	Об'єм одного вкладиша, см ³	Крок вкладишів, см	Відносна кількість вкладишів, шт./м ²	Відносний об'єм вкладишів, м ³ /м ²	см	відсоток конструктивної
Airdeck	4100	30	11	0,045	20,4	81,6
BubbleDeck	3100	20	25	0,076	17,2	68,8
Cobiax	9100	35	8,2	0,075	17,5	70,0
U-Boot Beton	28000	64	2,44	0,068	18,2	72,8
Монофант [11] (пінополістирол)	96000	100	1	0,096	13,0	52,0

З таблиці видно, що найважливіший показник – наведена товщина перекриття при використанні вкладишів з пінополістиролу значно менша, ніж для інших технологій, що в результаті веде до істотної мінімізації ваги конструкцій. Крім того, відзначається можливість використання цих конструкцій не тільки для нового будівництва, а також для реконструйованих будинків і споруд.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є одержання аналітичного й чисельного розв'язків задачі прямого проектування, згинальних елементів, результат яких поданий у вигляді геометричного «образу» конструкцій. Тут, на відміну від традиційного перевірного підходу, постулюється варіант постановки й розв'язання задачі топологічної оптимізації. Відмінність використовуваної процедури полягає в прийнятті нових критеріїв раціоналізації, що носять енергетичний характер. Крім того, вирішено завдання уніфікації знайдених геометричних параметрів конструкції й надання їй у вигляді порожнистого елемента. Наведено результати впровадження позначених конструктивних елементів.

Основна частина дослідження. У роботі прийнято такі гіпотези й припущення:

- розглядається плоска задача;
- вводиться припущення про ідентичність діаграм «напруження–

деформація» матеріалу конструкції балки для деформацій стиску й розтягу;

- постулюється можливість побудови діаграм «дотичне напруження – деформація зсуву» на базі трансформації діаграм стиску (розтягу) [6];

- ухвалюється положення про раціональність рівномірного розподілу погонної фібрової щільності потенційної енергії деформації (ЩПЕД);

- ухвалюється концепція січного модуля [7];

- ігнорується внесок енергії дотичних напружень порівняно з внеском енергії нормальних напружень до загального енергетичного балансу.

Математична модель. Вводиться в розгляд статично визначена симетрично завантажена балка (рис. 1). Мають місце два види завантаження: рівномірно розподілене навантаження й зосереджена сила, прикладена в центрі прогону. Для можливості використання надалі отриманого розв'язку для статично невизначених систем, включаючи спеціальні умови на кінцях балки, до опор прикладений момент $M_0 \in (0; M_u)$, де M_u – граничний момент.

Переріз балки (для спрощення) прийнятий прямокутним. При цьому $b = const$, $h(x)$ підлягає визначенню. Тут b – ширина перерізу, а $h(x)$ – висота.

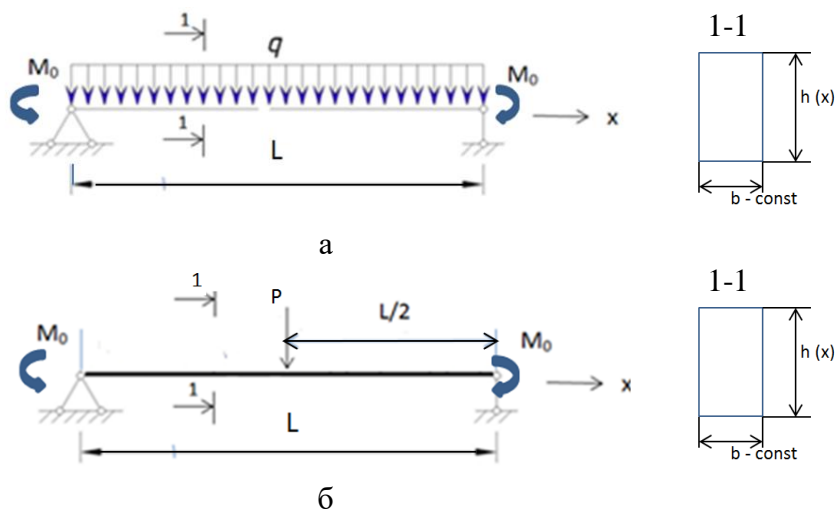


Рис. 1. Розрахункова схема балки: а – завантаження 1; б – завантаження 2

Діаграми матеріалу (задана й трансформована, за роботою [6]) наведені на рис. 2.

Відповідно до роботи [1] запишемо вираз для ЩПЕД:

$$e = e_{\sigma} + e_{\tau} = e_n, \quad (10)$$

де e_{σ} – щільність потенційної енергії деформацій, що накопичується від нормальних напружень;

e_{τ} – щільність потенційної енергії деформацій, що накопичується від дотичних напружень; внаслідок прийнятої гіпотези $e_{\tau} = 0$;

e_n – нормоване значення ЩПЕД, $e_n = \gamma \cdot e_u$, e_u – граничне значення ЩПЕД, $\gamma \in (0,1)$, γ – статистично обґрунтований параметр.

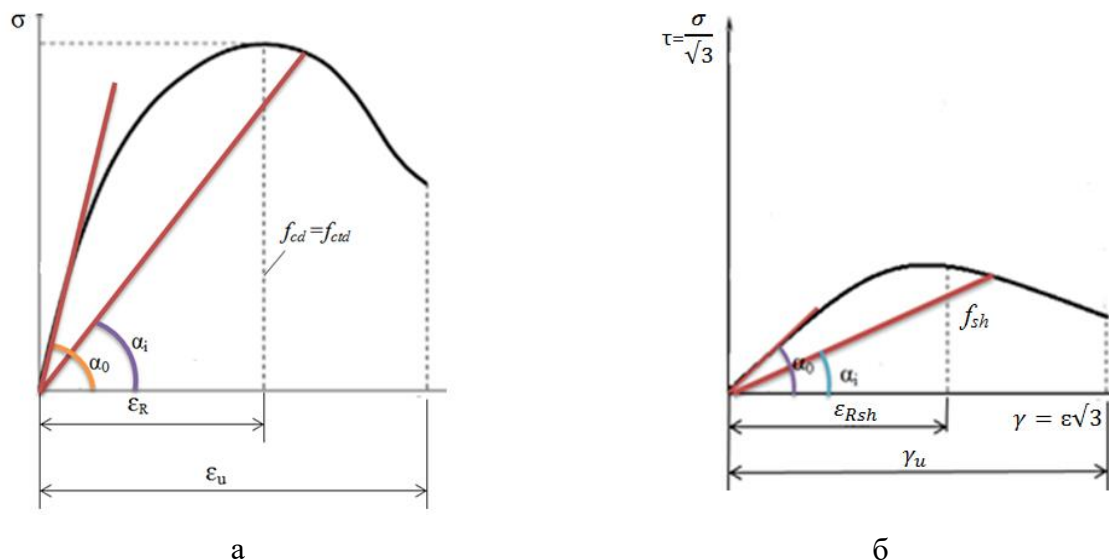


Рис. 2. Діаграми матеріалу: а – задана; б – трансформована; σ, τ – нормальні й дотичні напруження; ϵ, γ – лінійна й кутова деформації; f_{cd}, f_{ctd}, f_{sh} – межі міцності матеріалу; $E_0 = tg\alpha_0$; $E_c = tg\alpha_i$ – січні модулі

Тоді для ЩПЕД будемо мати

$$e_{\sigma} = \frac{\sigma^2}{2E_0}. \quad (2)$$

Проте для визначення головних напружень враховуються дотичні напруження [8]

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2}, \quad (3)$$

де $\sigma_{1,3}$ – головні напруження.

Максимальні нормальні й дотичні напруження, як відомо, дорівнюють

$$\sigma = \frac{M(x)}{W}, \quad (4)$$

$$\tau = \frac{Q(x) \cdot S}{b \cdot I}, \quad (5)$$

де W, I, S – момент опору, момент інерції й статичний момент перерізу балки. Усі ці величини є функціями координати « x »,

$$W = \frac{b \cdot h^2(x)}{6}; \quad I = \frac{b \cdot h^3(x)}{12}; \quad S = \frac{b \cdot h^2(x)}{8}; \quad (6)$$

$M(x), Q(x)$ – згинальний момент і поперечна сила в перерізі.

У свою чергу граничне значення ЩПЕД визначається за роботою [1]

$$e_u = 0,5 \chi_\sigma^2 [(\chi_\sigma + 1)e_{uc} + (\chi_\sigma - 1)e_{ut}] + (1 - \chi_\sigma^2)e_{ush} \quad (7)$$

або з урахуванням того, що $e_{uc} = e_{ut} = e$ [2],

$$e_u = \chi_\sigma^2 e + (1 - \chi_\sigma^2)e_{ush}, \quad (8)$$

де $\chi_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ –

параметр Лоде-Надаї напруженого стану;

$$\sigma_2 = 0;$$

$e_{uc}; e_{ut}; e_{ush}$ – парціальні ЩПЕД для деформацій стиску, розтягу й зсуву.

Підставляючи у вирази (1)–(4) вирази (5), (6), (8), одержимо

$$h^4(x) - \frac{18 \cdot M^2}{b^2 \cdot E_i \cdot \gamma \cdot e_u} = 0, \quad (9)$$

де $x \in (0, \frac{L}{2})$;

L – прогін балки.

Для першого завантаження

$$M(x) = -M_0 + \frac{qLx}{2} - \frac{qx^2}{2}. \quad (10)$$

Для другого завантаження

$$M(x) = -M_0 + P \frac{x}{2}. \quad (11)$$

Розв'язуючи вираз (9), одержимо

$$h(x) = \sqrt[4]{\frac{18M^2(x)}{b^2 \cdot E_i \cdot \gamma \cdot e_u}}. \quad (12)$$

Для випадку $M_0=0$ (статично визначена задача) розв'язок остаточний. При $M_0 \neq 0$ і необхідності його уточнення задача розв'язується ітераційно, у процесі чого уточнюється M_0 за апіорі заданим критерієм.

Чисельна реалізація задачі. Для чисельного аналізу розглянута статично визначена симетрично завантажена балка (рис. 1). Прогін балки $l = 6$ м. Стартовий переріз балки визначений з використанням традиційного методу зворотного проектування і прийнятий $b \times h = 200 \times 500$ мм. При цьому $b = const$, а висота $h(x)$ підлягає визначенню при розв'язанні задачі з умови енергетичної рівномірності. Для проектування прийнятий бетон класу С30/35 ($f_{cd} = 19$ МПа; $f_{ctd} = 1.33$ МПа). Крок розбиття половини балки за довжиною дорівнює 0.1 м. Розглядаються два окремі випадки завантаження балки: рівномірно розподілене навантаження (завантаження № 1) і зосереджена сила, прикладена в центрі прогону (завантаження № 2).

Завантаження № 1. Прийнято рівномірно розподілене погонне навантаження $g = 30$ кН/м. Розрахунок балки за наданим раніше алгоритмом зображено графічно на рис. 3, 4.

Завантаження № 2. Прийнята зосереджена сила, прикладена в середині прогону балки $P = 200$ кН. Розрахунок балки за наданим раніше алгоритмом зображено графічно на рис. 5, 6.

З метою зменшення обсягу обчислень введені однакові діаграми «напруження – деформації» для стиску й розтягу.

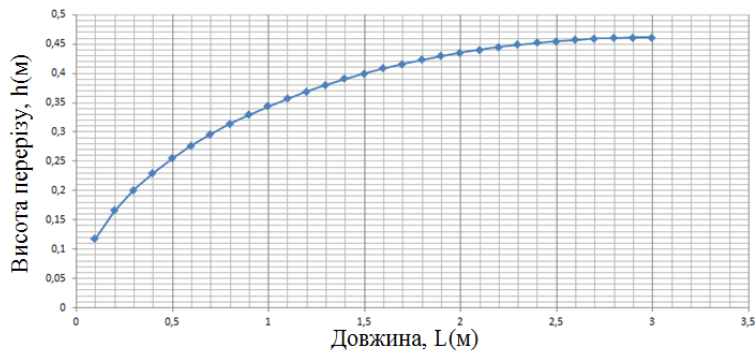


Рис. 3. Зміна висоти перерізу енергетично рівномірної балки. Завантаження № 1

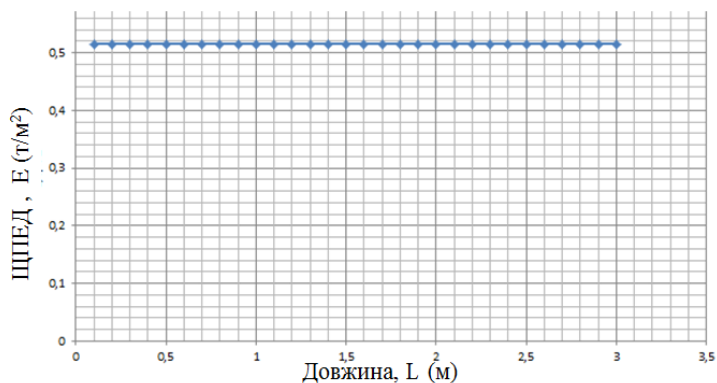


Рис. 4. Розподіл фібрової ЩПЕД за довжиною балки. Завантаження № 1

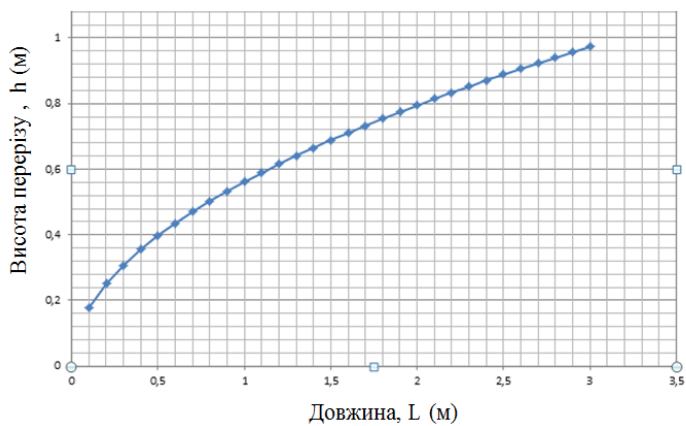


Рис. 5. Зміна висоти перерізу енергетично рівномірної балки. Завантаження № 2

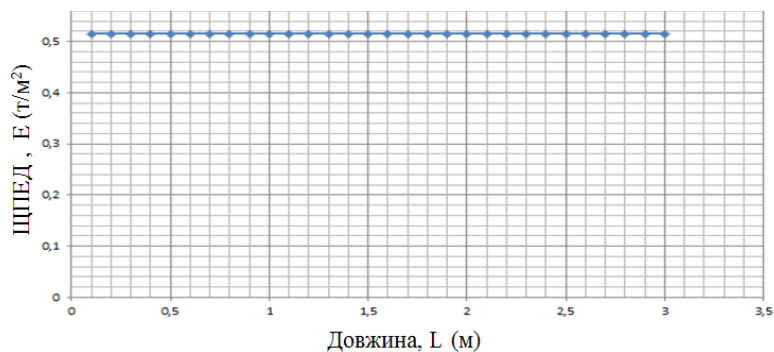


Рис. 6. Розподіл фібрової ЩПЕД за довжиною балки. Завантаження № 2

Додатковою до виразу (12) має бути операція визначення $h(x)$ в опорних перерізах. Виконання позначеної процедури для випадку $e_\tau \neq 0$, дає

$$h_0 = \sqrt{\left[\frac{\gamma_1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\gamma_2}{\gamma_1^2}} \right) \right]}, \quad (13)$$

де h_0 – висота опорного перерізу;

$$\gamma_1 = \frac{9 \cdot Q_0^2}{8 \cdot b^2 \cdot E_0 \cdot \gamma \cdot e_u \cdot f};$$

$$\gamma_2 = \frac{18 \cdot M_0^2}{b^2 \cdot E_0 \cdot e_u};$$

де M_0, Q_0 – згинальний момент і перерізаюча сила в опорному перерізі;

f – емпіричний коефіцієнт;

E_0 – початковий модуль деформації 1-го роду.

З метою встановлення відносної універсальності критеріїв, позначених у роботі [2], слід оцінити жорсткість стрижня змінного перерізу, отриманого в наведених раніше задачах. Дана обставина є логічним доповненням того факту, що розв'язок виразу (12) визначає мінімальні витрати матеріалу. Тут і надалі матеріал балки вважається однорідним, що автоматично дозволяє замість ваги розглядати об'єм. У зв'язку з цим доцільно порівняти об'єм матеріалу отриманого стрижня з об'ємом матеріалу балок, що знаходяться у позначених умовах, при їхніх однакових максимальних прогинах, але при інших розподілах висот. Зокрема розглядається задача про мінімізацію обсягу балки при заданому прогині (ізопериметрична задача) [9]. Характер зміни висоти у цьому випадку визначений виразами:

○ для рівномірно розподіленого навантаження

$$h(x) = \left[3\lambda \xi^2 (1 - \xi) \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (14)$$

де $\lambda = 0,0217a^{-\frac{4}{3}}$;

де $a = \frac{f_{\max} \cdot b \cdot E_0}{3 \cdot q \cdot L^4}$;

де f_{\max} – максимальний прогин у центрі

балки; $f_{\max} \in \left(\frac{L}{200}; \frac{L}{400} \right)$;

$$\xi = \frac{x}{L};$$

○ для зосередженої сили в середині прогону

$$h(x) = 0,696 \cdot a_1^{-\frac{1}{3}} \cdot \xi^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

де $a_1 = \frac{f_{\max} \cdot b \cdot E_0}{3 \cdot q \cdot L^3}$.

Природно, і це відзначається в роботі [9], дані розв'язки потребують перевірки на міцність. Перевірка показує, що для вихідних даних наведених прикладів умови міцності перерізів не виконуються. Характер зміни висоти балки наведений на рис. 7.

Розміри поперечного перерізу балки суцільного перетину, за роботою [9], прогин якої $f_{\max} = 1,5$ см, $b \times h = 200 \times 425$ мм (для завантаження № 1) і $b \times h = 200 \times 470$ мм (для завантаження № 2). Однак вимоги міцності тут також не виконуються. Мінімальні розміри перерізу балки, при яких виконуються обмеження за міцністю і жорсткістю, дорівнюють $b \times h = 200 \times 470$ мм (для завантаження № 1) і $b \times h = 200 \times 690$ мм (для завантаження № 2). Порівняння об'ємів матеріалу отриманих балок наведено на рис. 8, 9.

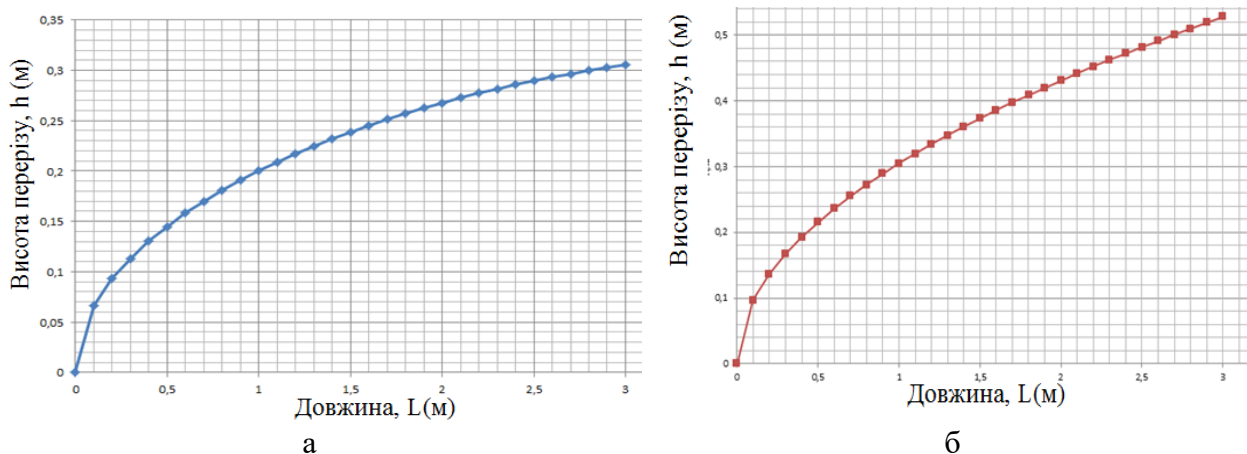


Рис. 7. Зміна висоти перерізу балки мінімального об’єму при заданому прогині $f_{max}=1.5\text{см}$: а – завантаження № 1; б – завантаження № 2

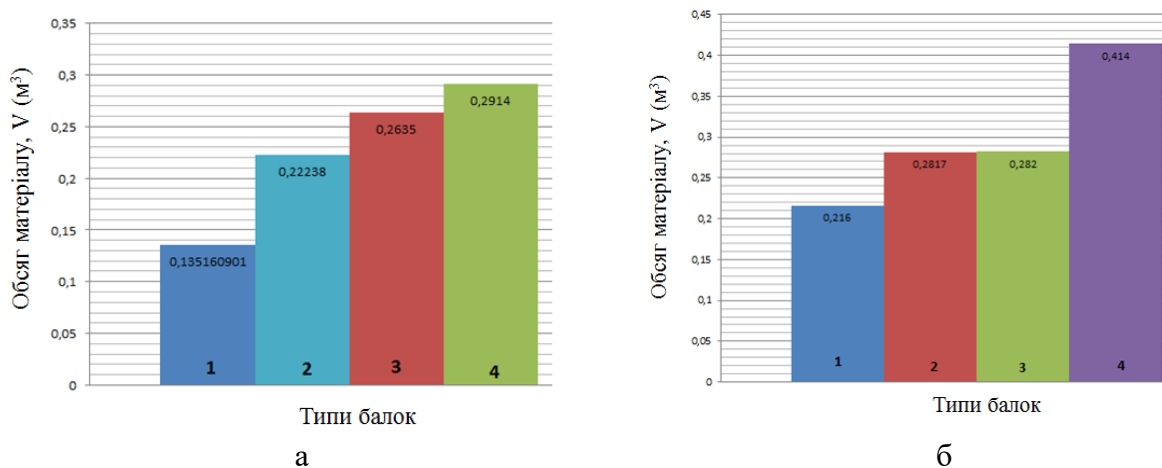


Рис. 8. Об’єм матеріалу розглянутих балок: а – завантаження № 1; б – завантаження № 2; 1 – балка мінімального об’єму при заданому прогині; 2 – балка з рівномірними перерізами; 3 – балка суцільного перерізу при заданому прогині; 4 – балка постійного перерізу, підбраного з дотриманням обмежень за міцністю і жорсткістю

Виконані вище розрахунки й аналіз наведених діаграм дозволяють зробити висновок про те, що міцнішим і деформаційним обмеженням відповідають тільки балки 2 і 4. Проте витрати матеріалу в балці, переріз якої визначено з використанням запропонованої в даній роботі ідеології, на 31% нижче витрат матеріалу в балці, підбраної з використанням традиційного методу зворотного проектування (завантаження № 1). У випадку завантаження балки зосередженою

силою в середині прогону (завантаження № 2) цей показник склав 46.8 %

Технологія побудови розв’язків. Загальний випадок [1]. Процедура пошуку розв’язків для розглянутої проблеми в загальному випадку складається з формування «еталонної» й остаточної частин. При цьому домінантною складовою запропонованого тут підходу є методологія побудови «еталонного» розв’язку. У її основі лежить компіляція, що синтезує в собі метод кінцевих елементів і метод

адаптивної еволюції [1]. Комбінація методу кінцевих елементів і методу регулювання параметрів системи, особливо у формі методу адаптивної еволюції, обумовлює можливість побудови процедури прямого визначення фізико-геометричних характеристик конструкцій. Сформований алгоритм припускає визначення внутрішніх параметрів системи як результат послідовної побудови енергетично рівномірної системи. Як відомо, саме оптимізована рівномірна система забезпечує мінімізацію витрат матеріалу конструктиву.

Сказане означає поняття «еталонної» конструкції як системи, у якій у всіх елементах виконується умова $e = const$ (e – щільність енергії деформацій). Для найменш матеріаломістких систем $e = e_u$ (e_u – гранична щільність енергії деформацій) [1]. Побудований компілятор визначає ітераційне уточнення геометричних або (і) фізико-механічних параметрів системи відповідно до умови $e \rightarrow e_u$. При цьому на кожному кроці ітераційного процесу експлуатується метод кінцевих елементів, а еволюційна адаптація полягає в можливості урахування на i -му кроці величин параметрів, отриманих з будь-яких попередніх кроків (спадковість). Отриманий розв'язок у загальному випадку не задовольняє обмеження за переміщеннями, шириною розкриття тріщин, частотами власних коливань, технологічними і т. д. Дана обставина призводить до необхідності збільшення перерізів енергетично рівномірних елементів. У зв'язку з цим формується додаткова задача:

$$\Delta V(\{\alpha\}) \rightarrow \inf, \quad (16)$$

$$\omega^{\min} \geq \omega_{adm}; a_{crc}^{\max} \leq a_{adm}; f^{\max} \leq f_{adm}, \quad (17)$$

де ΔV – додатковий об'єм матеріалу;
 $\{\alpha\}$ – вектор розшукуваних параметрів;

$\omega^{\max}; \omega_{crc}^{\max}; f^{\max}$ – мінімальне (максимальне) значення частоти власних коливань, ширини розкриття тріщин і прогину;

$\omega_{adm}; a_{adm}; f_{adm}$ – відомі постійні, прийняті, як правило, на підставі національних норм.

Розв'язання задачі (16), (17) зводиться до пошуку деякого нового, відносно еталонного, ізоенергетичного стану системи, при якому $e < e_u \wedge e_{mi} = const$. Топологія еталонної, тобто енергетично рівномірної, системи ($e = e_u$) ухвалюється за початкове наближення (e_{mi} – знижене значення граничного значення щільності потенційної енергії).

Далі для еталонного розв'язку перевіряється виконання обмежень (17). У випадку їх задоволення даний розв'язок вважається остаточним. У загальному ж випадку еталонний розв'язок не буде розв'язком виразів (16), (17). Тоді вводиться поняття умовної граничної щільності енергії деформацій e_{um} (m – номер нерівності у виразі (17)).

У подальшому процедура будується за типом алгоритму Кіффера-Джонсона виходу на межу області припустимих розв'язків. У результаті експлуатації розглянутого ітераційного алгоритму визначаються геометрія й (або) фізико-механічні характеристики нової конструкції.

Специфічною особливістю тут є той факт, що параметрами керування можуть служити фізико-механічні параметри кінцевого елемента

$$C_{i+1}^L = (e_L e_n^{-1}) C_i^L, \quad (18)$$

де i – номер ітерації;

C_i^L – фізико-механічний параметр, у загальному випадку для анізотропного L -го кінцевого елемента на i -му кроці ітерації.

У випадку ізотропного тіла залежність (18) набуває вигляду

$$E_{i+1}^L = (e_L e_n^{-1}) E_i^L, \quad (19)$$

де E_i^L – модуль деформації 1-го роду.

При цьому коефіцієнт поперечної деформації може (за необхідності) ухвалюватися за замовчуванням як неварійований через незначний інтервал його зміни $\nu \in (0,0,5)$. В остаточному вигляді еталонний розв'язок являє собою сукупність модулів деформації, що відповідає енергетично рівномірному елементу. Тоді структура «еталонної» конструкції в синергетичному сенсі може формуватися за рахунок керування полем E . У цьому випадку E є узагальненим параметром.

Ще раз підкреслимо, що запропонований метод пошуку раціональної структури конструктивних систем має чіткий фізичний сенс і добре корелює з

загальнофізичними уявленнями про їхній опір зовнішнім впливам.

Ізоенергетичність як раціональна форма існування штучних елементів властива природним самоорганізованим системам і забезпечує найбільш прийнятний розподіл матеріалу, а також його ефективну роботу в конструкції. Обчислювальний аспект проблеми зводиться до створення надбудов над існуючими обчислювальними комплексами, алгоритми яких фундовані методом кінцевих елементів. З огляду на смисловий зміст запропонованого методу, інші віртуальні аналогічні реалізації, а також відкритий доступ до інтерфейсів обчислювальних комплексів, з'являється можливість їх зчленування з програмами, що генерують параметри, які при традиційному проектуванні задаються примусово (вихідні дані). Як ілюстрація застосування загального підходу нижче наводяться результати розв'язання розглянутих прикладів, отримані на підставі позначеного алгоритму. Розв'язок знаходився в середовищах «Ліра 10.6» і декількох спеціально складених утиліт (рис. 9).

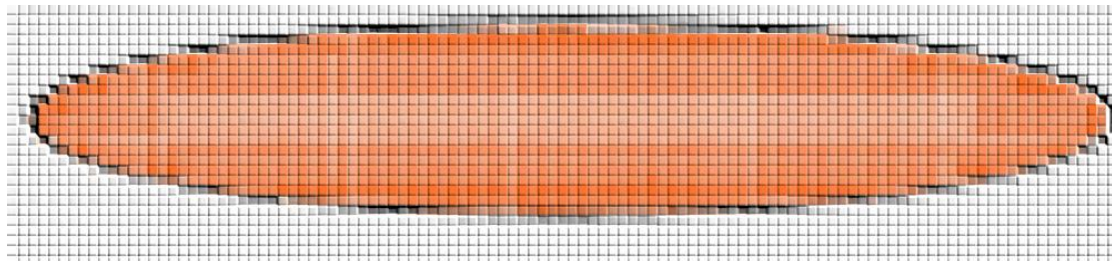


Рис. 9. Розв'язання завдання (завантаження № 1) загальним методом.
Світле поле відповідає значенням $E \approx 0$

Як впливає з зіставлення розрахованих топологій балок (рис. 8), відмінності результатів практично не спостерігаються. Тут слід зазначити ту обставину, що при експлуатації запропонованого підходу нема необхідності переформатизації сітки кінцевих елементів на кожному кроці ітераційної процедури (рис. 9).

Уніфікація конструкції. Для спрощення створюваної технологічної процедури доцільно уніфікувати переріз отриманої енергетично рівномірної балки. Розв'язок будується методом динамічного програмування Р. Белмана. Варіанти уніфікації половини довжини балки до 2, 3 і 4 щаблів наведені на рис. 10–12.

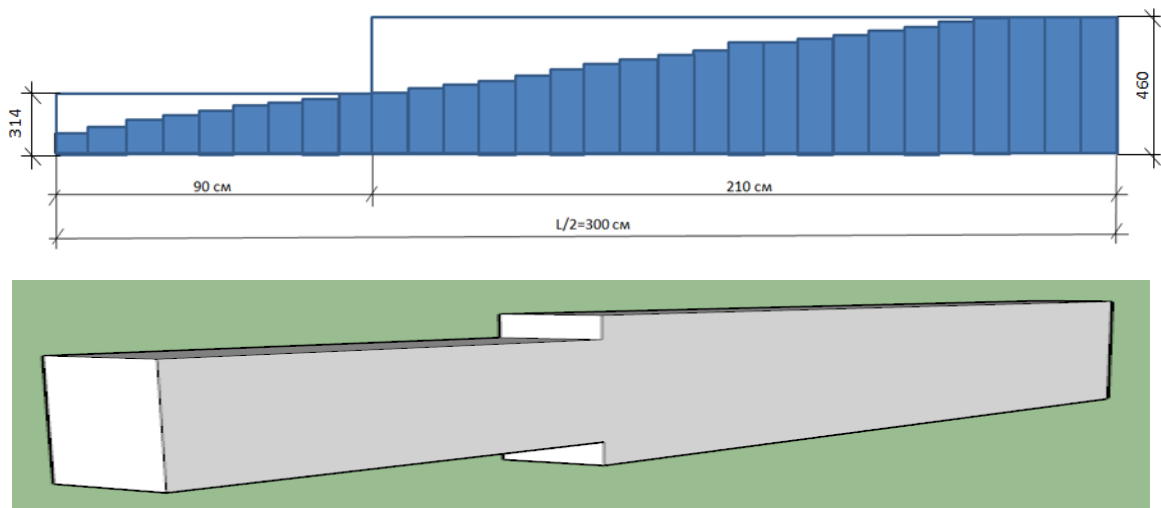


Рис. 10. Варіант уніфікації половини довжини балки (2 щаблі)

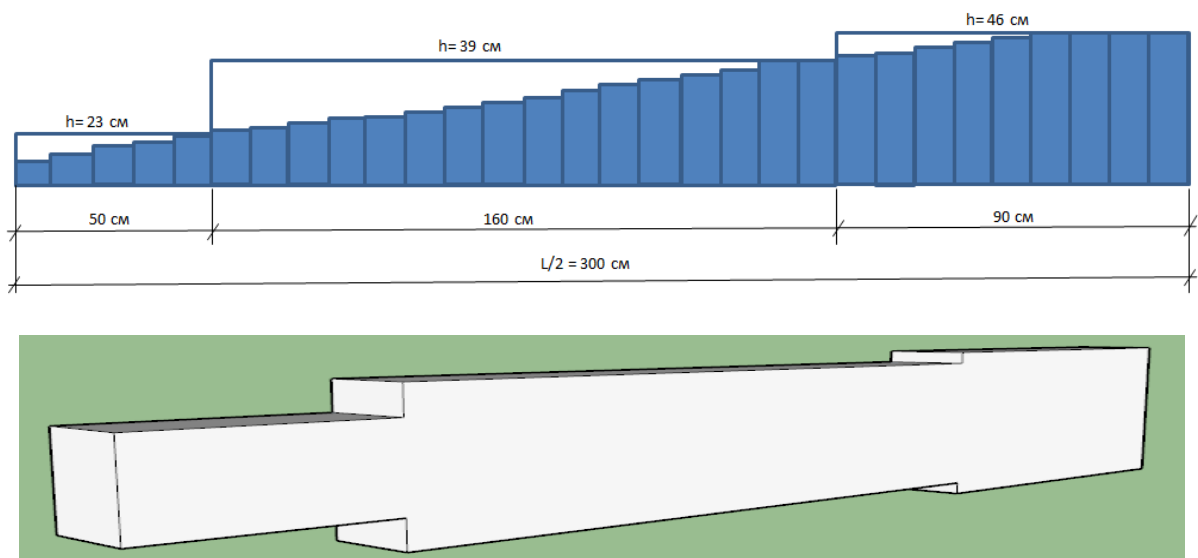


Рис. 11. Варіант уніфікації половини довжини балки (3 щаблі)

Як бачимо з рисунків, об'єм матеріалу балки, який додається до її перерізу, у результаті уніфікації збільшується зі зменшенням кількості її щаблів. Залежність витрат матеріалу балки при уніфікації її перерізу від кількості щаблів за її довжиною наведена на рис. 13.

Як відзначено в роботі [1], одним з можливих напрямів при проектуванні раціональних будівельних конструкцій

взагалі й залізобетонних зокрема є створення елементів із простою зовнішньою і складною внутрішньою геометрією.

Простота зовнішніх форм, як відомо, породжує простоту конструктивних розв'язків вузлів стикування різнорідних частин спорудження й забезпечує, як наслідок, можливість реалізації віртуального об'ємно-планувального розв'язку.

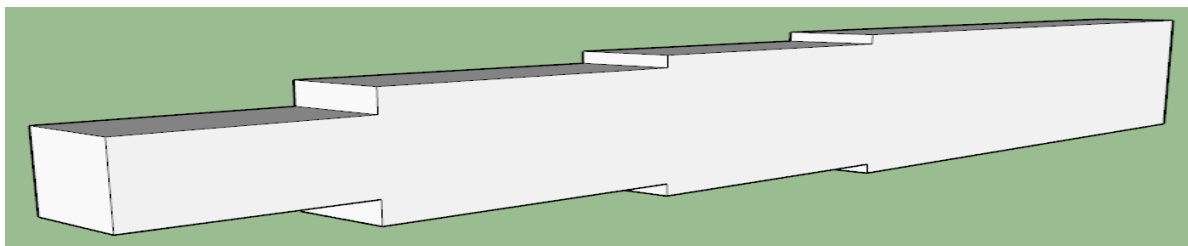
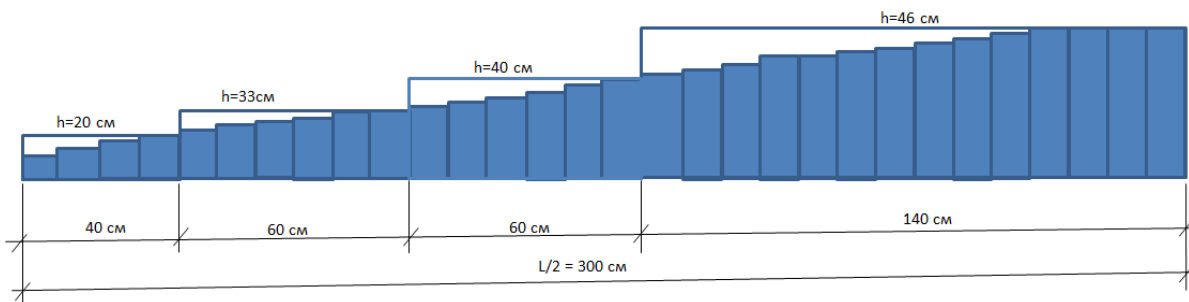


Рис. 12. Варіант уніфікації половини довжини балки (4 щаблі)

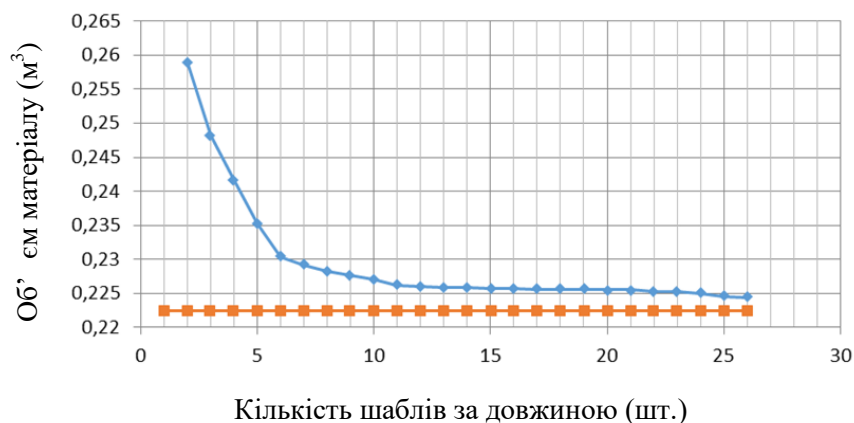


Рис. 13. Витрати матеріалу балки при уніфікації її перерізу

У свою чергу спрямоване ускладнення внутрішньої геометрії визначає задоволення необхідного набору критеріїв і обмежень, що означають ефективність конструкцій.

Використовуючи формули, запропоновані в роботі [1], визначимо геометричні розміри коробчатого перерізу досліджуваних балок, які мають рівнозначні геометричні характеристики (W , I , S) на кожній ділянці за довжиною, причому товщину стінок коробчатого перерізу ухвалюємо постійною й рівною 50 мм. Таким

чином, формується енергетично рівномірна балка з простою зовнішньою і складною внутрішньою геометрією (рис. 14, 15).

Реалізація отриманих розв'язків здійснена в рамках формування елементів конструктивних систем зі збірною й монолітною залізобетону (системи РАМПА, ІКАР, ДОБОЛ, МОНОФАНТ) [1, 10]. Тут складна внутрішня геометрія формується за рахунок вкладишів-пустотоутворювачів з пінополістиролу з $\gamma = 25 \text{ кг/м}^3$ (рис. 16-17).

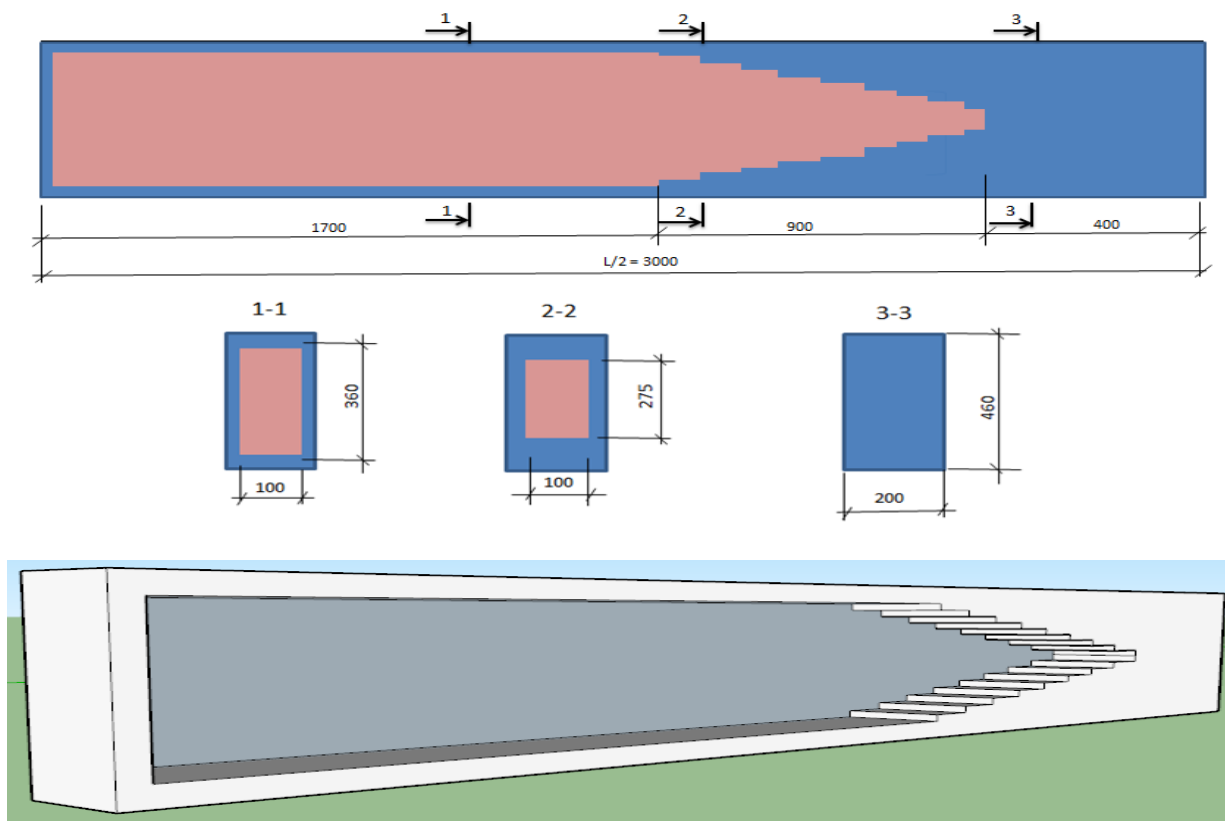


Рис. 14. Внутрішня структура половини (через симетрію) довжини балки з простою зовнішньою і складною внутрішньою геометрією (завантаження № 1)

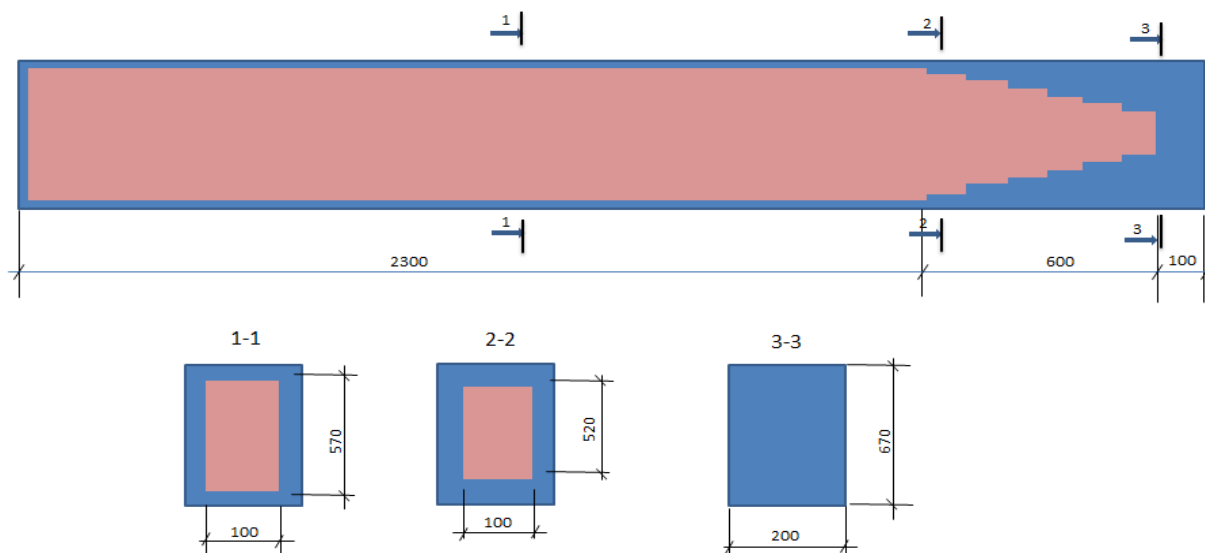


Рис. 15. Внутрішня структура половини (через симетрію) довжини балки з простою зовнішньою і складною внутрішньою геометрією (завантаження № 2)



а



б

Рис. 16. Розважальний комплекс «Місто», м. Харків: а – загальний вигляд; б – конструкція фундаментної плити



а



б

Рис. 17. Торгово-офісний будинок, м. Харків: а – загальний вигляд; б – конструкція плити перекриття

Висновки. Отриманий переріз балки визначено, як вказувалося вище, шляхом використання нового прогресивного напрямку, названого топологічною (біонічною) оптимізацією, що забезпечує формування конструктивних систем з наперед заданими позитивними властивостями. Слід зазначити, що безліч об'єктів живої природи мають складну внутрішню геометрію. Доцільно розглянути структуру кісток скелетів людини й тварин, стовбури дерев, листя рослин та ін. Ще Галілео Галілей, досліджуючи міцність порожнистих балок, указував «... кілька зауважень щодо опору твердих тіл

порожнистих або порожніх усередині, якими як майстри, так і природа користуються на тисячі ладів. У них без зростання ваги досягається зростання міцності в досить великому ступені, як те легко можна бачити на кістках птахів і на очереті, які при великій легкості відрізняються й великою опірністю вигину й зламу. ... Було помічено на ділі й підтвержене досвідом, що палиця, порожня усередині, а також дерев'яна й металева труба, міцніше, ніж масивне тіло тієї ж довжини й рівної ваги, яке неминує є більш тонким ...» [11].

Список використаних джерел

1. Шмуклер В. С., Климов Ю. А., Бурак Н. П. Каркасные системы облегченного типа: монография. Харьков, 2008, 336 с.
2. Васильков Г. В. Эволюционная теория жизненного цикла механических систем. Теория сооружений. Москва: Издательство ЛКИ, 2008. 320 с.
3. Zuo Z. H., Xie Y. M., Huang X. Combining genetic algorithms with BESO for topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2009. Vol. 38(5). P. 511-523.
4. Tcherniak D. Topology optimization of resonating structures using SIMP method. *International Journal of Numerical Methods Engineering*. 2002. Vol. 54(11). P. 1605-1622.
5. Оганесян П. А., Шевцов С. Н. Оптимизация топологии конструкций в пакете ABAQUS. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16. № 6(2). С. 543-549.
6. Феодосьев В. И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. Москва: Наука, 1996. 368 с.
7. Шэнли Ф. Р. Анализ веса и прочности самолетных конструкций. Москва: Оборонгиз, 1957. 408 с.
8. Гольденблат И. И., Копнов В. А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов: учеб. пособие. Москва, 1968. 192 с.
9. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости: учеб. пособие / Н. П. Абовский и др.; под ред. Н. П. Абовского. Москва, 1978. 189 с.
10. Эффективные железобетонные конструкции: монография / В. Н. Бабаев и др.; под ред. А. И. Адилходжаева, В. С. Шмуклера. Ташкент, 2019. 416 с.
11. Галилей Галилео. Избранные труды в 2-х томах. Т. 2. Москва: Наука, 1964. 572 с.

Шмуклер Валерій Самуїлович, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.

ORCID iD: 0000-0000-0000-0000. Тел.: (057) 707-31-07. E-mail: v_shmukler@hotmail.com.

Лугченко Олена Іванівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0001-5397-355X.

Тел.: (098) 716-30-30. E-mail: elenalugchenko@gmail.com.

Нажем Алі Хусейн, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0001-7247-4457. Тел.: (073) 217-07-33.

E-mail: ali.h.najem@hotmail.com.

Shmukler Valeriy, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Building Structures, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0000-0000-0000. Tel: (057) 707-31-07.

Email: v_shmukler@hotmail.com.

Lugchenko Olena, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Building Structures, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-5397-355X. Tel: (098) 716-30-30.

Email: elenalugchenko@gmail.com.

Nazhem Ali, postgraduate student, Department of Building Structures, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-7247-4457. Tel: (073) 217-07-33. Email: ali.h.najem@hotmail.com.

Статтю прийнято 24.01.2020 р.

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 528.1

ГЕОДЕЗИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ПЛАНОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КРИВИХ

Кандидати техн. наук О. С. Саяпін, Є. Ф. Орел, С. М. Камчатна, О. М. Ужвієва

GEODESIC CONTROL OF THE PLANNED POSITION OF THE OUTSIDE CURVES

PhD (Tech.) O. Saiapin, PhD (Tech.) E. Orel, PhD (Tech.) S. Kamchatna,
PhD (Tech.) E. Uzhvieva (Uzhviieva)

Анотація. Завдання забезпечення належної якості утримання залізничних кривих може бути вирішено шляхом створення спеціальних реперних систем на ділянках кривих. Наведено розрахунки для визначення величин зсувів у точках кривої для переміщення цих точок у проектне положення та послідовність їх закріплення. Виділено особливості застосування електронних тахеометрів під час приведення залізничних кривих до проектного положення, наведено технологію робіт.

Ключові слова: залізничні криві, геодезичний контроль, реперні системи, електронний тахеометр.

Abstract. Rail curves are the most vulnerable places on the rail in terms of design parameters violations. Existing approaches to the geodetic maintenance of the planned position of railway curves do not ensure the preservation of their design indicators. The way that can solve this problem is to create special benchmark systems on the sections of the curves. The main points of this system should be the vertices of the track or the points that allow you to determine the position of the vertex angle. More rational to date and far less costly is to set up local benchmark systems that are created for a single curve or group near the curves located.

Created benchmark system in the future allows you to virtually exclude geodetic works from the current retention of the rail curve, reducing the control of its planned position to the measurements of distances from the benchmarks. These measures should be included in railway track reconstruction and repair projects. The definition of indentation in the plan can be made with respect to the chord that connects the intermediate points of the curve with the accepted interval of the breakdown. Calculations are made to determine the magnitudes of measurements within the transition and circular curves and the sequence of fixation of the value of displacements at the points of the curve to move these points to the design position.

The peculiarities of the use of electronic tacheometers in bringing the railway curves to the design position are highlighted. Taking a curve with an electronic tachometer can be done in detail at all points of the breakdown or in a combined way, when the tachometer determines the coordinates of a limited number of points between which the displacements are determined.

Keywords: railway curves, geodetic control, benchmarking, electronic tachometer.

Вступ. Залізничні криві – найбільш проблемні ділянки залізниці з погляду

дотримання проектного положення рейкової колії. Динамічні навантаження

рухомого складу, деформації земляного полотна [11], численні рихтування та підіймання колії роблять криві найбільш вразливими місцями на залізниці з точки зору порушення проектних параметрів.

Наявні підходи до геодезичного забезпечення планового положення залізничних кривих не сприяють збереженню їхніх проектних показників. Так, у процесі виконання польових геодезичних робіт, як правило, не координують вершини кутів повороту траси, вирішуючи завдання оптимізації за мінімумом суми квадратів величин рихтувань (зсувів) колії. Апроксимація положення колії за цим принципом призводить до того, що оптимальна крива розташовується довільно відносно бісектриси кута повороту траси, центр кривої не лежить на ній, порушуються всі геометричні параметри кривої, стає невизначеним положення на ній усіх її основних точок і відстаней між ними. Застосування такої технології на місцевості суттєво ускладнює узгодження перехідних кривих з круговими внаслідок зміщення початку та кінця перехідних і кругових кривих. Залізнична колія фактично «блукає» по земляному полотну від ремонту до ремонту.

Недоліки геодезичного контролю прямолінійних ділянок траси також призводять до порушення проектного положення основних точок кривих, зокрема вершини кута повороту. Наприклад, під час експлуатації на прямих великої протяжності (більше 3-5 км) спостерігаються помітні ухилення осі колії від ліній тангенсів, що з'єднують суміжні вершини кутів її повороту. Об'єктивною причиною такого явища може бути похибка відновлення лінії тангенсів непрямыми способами, коли, наприклад, нема видимості між суміжними вершинами кутів повороту траси. Таким чином, поточне утримання колії і подальший ремонт, проєктований за результатами зйомок залізниці, досить часто призводить до необхідності призначати на

першій прямолінійній ділянці не менше двох додаткових кутів повороту. Це свідчить про необхідність більш ретельної геодезичної підготовки прямолінійних ділянок залізниці значної протяжності.

Потрібні заходи, які сприяли б уникненню наведених вище ситуацій і дозволили б підвищити якість будівельних, ремонтних робіт і в кінцевому результаті якість утримання колії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різним аспектам удосконалення технології геодезичних робіт на залізницях, зокрема в кривих ділянках, присвячена достатня кількість публікацій і досліджень. Наприклад, у роботі [2] запропоновані нові методи зйомки кривих. Нова методика визначення геометричних характеристик залізничної колії за допомогою геодезичних даних розглянута в роботі [3]. Впливу геодезичної підготовки на якість виправлень та рихтувань колії присвячена робота [7].

Геодезичні реперні системи належать до спеціальних геодезичних мереж [1]. Доцільність використання реперних систем на залізницях, вимоги до них, основні параметри викладені в роботах [4, 8, 9]. У публікації [5] показано використання реперів для зйомки, моніторингу, рихтувань та укладання колії. Вимоги до спеціальних реперних систем контролю колії в плані сформульовано в роботі [6].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою публікації є підвищення якості утримання залізничної колії у кривих ділянках шляхом удосконалення геодезичного забезпечення колійних робіт.

Завданнями для виконання цієї мети є:

- шляхи застосування спеціальних реперних систем як опорної основи для провадження геодезичних робіт у кривих;
- провадження геодезичних робіт у кривих ділянках в умовах реперних систем;
- особливості використання електронних геодезичних інструментів в умовах реперних систем.

Основна частина дослідження. На сьогодні існують дві системи утримання геометрії залізниць:

– європейська, заснована на реперних системах, покликаних підтримувати проектну геометрію залізниць;

– безреперна, при якій проектною геометрії колії фактично не існує, що, як відомо, веде до появи довгих нерівностей у плані та профілі, швидкого зносу елементів колії й рухомого складу, зокрема при швидкостях руху 100 км/год і більше.

На українських залізницях для геодезичного контролю положення рейкової колії в більшості випадків застосовується друга система, що залишилася як традиційна від радянських часів. Перша система використовується епізодично на найбільш відповідальних ділянках і спорудах залізничного транспорту, не в останню чергу внаслідок значних витрат на створення реперних систем.

Спеціальна реперна система – це планово-висотна геодезична мережа витягнутої форми. Вона складається з пунктів опорної геодезичної мережі (ОГМ) і робочої мережі (РМ) [7].

Пункти ОГМ розташовуються в смугі відведення, споруджуються за нормами закладання пунктів державної мережі на відстані 250–750 м один від одного з обов'язковою видимістю між сусідніми пунктами. Робоча мережа реперної системи створюється в безпосередній близькості від залізничної колії з відстанями між пунктами 100–140 м на прямих і 50–70 м на кривих ділянках колії. Робочі реperi, як правило, розташовуються на опорах контактної мережі або в безпосередній близькості від опори на рівні головки рейки. При визначенні відміток робочих реперів похибка нівелювання 1 км не має перевищувати ± 4 мм, а взаємне положення сусідніх реперів не має перевищувати в плані ± 5 м і по висоті ± 3 мм.

Такі реперні системи доцільно закладати під час будівництва або реконструкції залізниці. Їх створення

потребує значних витрат, що є дуже вагомим фактором у наш час.

Більш раціональним з практичної точки зору на теперішній момент і значно менш витратним є закладання локальних реперних систем. Така система створюється для окремої кривої або групи поблизу розташованих кривих. Головними точками цієї системи мають стати вершини кутів повороту траси. Їх слід закріпити на місцевості довгочасними центрами і розпізнавальними знаками. Крім того, поверхня має бути не нижче (краще вище) рівня земляного полотна. Якщо вершина кута недоступна для її закріплення на місцевості, то замість неї пропонується закласти два центри на лініях тангенсів [10]. При цьому високої точності їх розміщення не потрібно, оскільки після їх установлення по всій трасі необхідно передбачити остаточне вимірювання кутів її повороту.

На існуючій залізниці процес створення реперної системи ускладнюється. Викликано це тим, що в процесі експлуатації втрачено майже всі вершини кутів повороту траси і з'явилися додаткові кути на прямолінійних ділянках значної протяжності. Тому створювати мережу реперів можна тільки за матеріалами докладних зйомок існуючої колії і польового трасування з використанням проектних кутів і відстаней. І починати роботу слід з відновлення вершин кутів повороту траси. Окремі вершини, на яких не збереглися знаки кріплення, можна спробувати знайти промірами від збережених місцевих предметів згідно з абрисами їх прив'язки або прямою засічкою за проектними кутами з двох сусідніх вершин траси. Можна вирішити це завдання і за матеріалами зйомки (координатами, що фіксують криву точок), але за попередньо закріпленими на місцевості (у процесі зйомки) прямолінійними відрізками (лініями тангенсів), спрямованими на суміжні вершини. Відстані між точками фіксації прямих мають бути максимально можливими. Потім за технологією,

викладеною в роботі [3], знаходять оптимальні параметри кривої для майбутньої реконструкції (ремонту) цієї ділянки, а також координати вершини кута і сам кут повороту траси. Після винесення вершини кута в натуру залишилося вирішити питання, чи може вона бути головною реперною точкою (за розташуванням на місцевості) або її необхідно замінити двома реперами по лініях тангенсів.

Найбільш відповідальним моментом на даній стадії відновлення траси є обґрунтований вибір лінії тангенсів, що фіксують напрямки прямолінійних ділянок колії, особливо якщо вони за проектом були досить протяжними, а в результаті численних реконструкцій і ремонтів отримали додаткові повороти, нехай і на незначні кути. Тому перед фіксацією прямих необхідно проаналізувати матеріали зйомок, що проводилися перед останніми ремонтними роботами на даній ділянці, щоб випрямити або зменшити кількість поворотів, дотримуючись встановлених габаритів.

Створена реперна система взагалі дозволяє в подальшому повністю виключити геодезичні роботи з поточного утримання залізничної колії, зводячи контроль його планового положення до промірювань відстаней від реперів. Вони ж (проміри) мають увійти до проектів реконструкції та ремонту залізничної колії.

Визначення фактичного положення колії в плані і порівняння його з проектним викликає значні труднощі в кривих ділянках колії. На прямих ділянках зсуви визначаються від лінії, що задається оптичними або лазерними інструментами.

Підвищення швидкостей руху та посилення вимог до норм утримання кривих вимагають пошуку ефективних методів контролю виправлення колії на кривих. Такими методами нині є роботи від фіксованих точок, розташованих безпосередньо на колії [7].

При створенні реперної системи контролю положення колії розрахунками визначаються горизонтальні відстані від кожного репера до робочої грані рейки й осі колії. За допомогою простих вимірювальних приладів визначаються їх відхилення від проектних значень. На ділянках між фіксованими точками в кожній точці розмітки визначення відступів у плані може бути виконано відносно хорди, що з'єднує ці точки. Попередньо виконується детальна розмітка проміжних точок з прийнятим інтервалом і обчислюються проектні значення стріл вигину на кожній з них.

У межах перехідних кривих стріли вигину обчислюються від хорди, що стягує початок і кінець перехідної кривої за значеннями прямокутних координат від тангенсів (рис. 1).

$$\lambda_i = K \cdot \left(1 - \frac{K^4}{40R^2l^2} + \frac{K^8}{3456R^2} - \dots \right);$$

$$y_i = \frac{K^3}{6Rl} \cdot \left(1 - \frac{K^4}{56R^2l^2} + \frac{K^8}{7040R^4l^4} - \dots \right),$$

де K – прийнятий інтервал розбиття;

R – радіус кругової кривої;

l – довжина перехідної кривої.

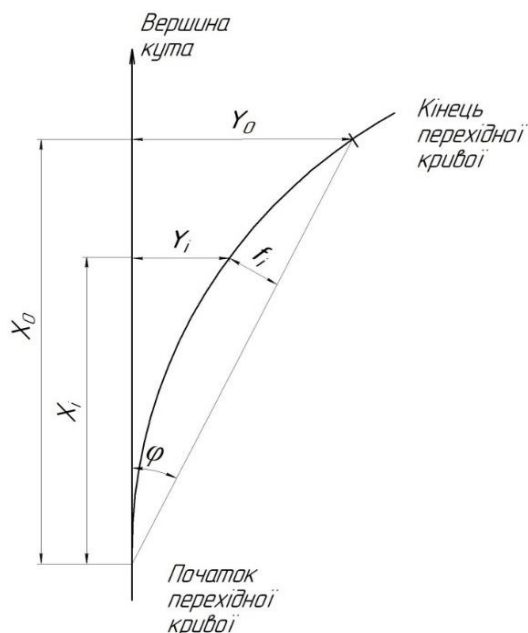


Рис. 1. Визначення стріл вигину на перехідній кривій

Згідно з прийнятим інтервалом розбиття за прямокутними координатами від тангенса x_i та y_i визначаються стріли вигину f_i .

$$f_i = x_i \cdot \sin \varphi - y_i \cdot \cos \varphi ;$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Y_0}{X_0} \right),$$

де φ – кут між тангенсом і хордою;
 X_0, Y_0 – координати кінця перехідної кривої.

У межах кругової кривої (рис. 2) проектні стріли вигину f_{np} в точках розмітки від хорди, що стягує фіксовані точки, можуть бути визначені за формулою

$$f_{np} = \frac{a \cdot b}{2R},$$

де a, b – відстань від точки до кінців хорди;
 R – радіус кругової кривої.

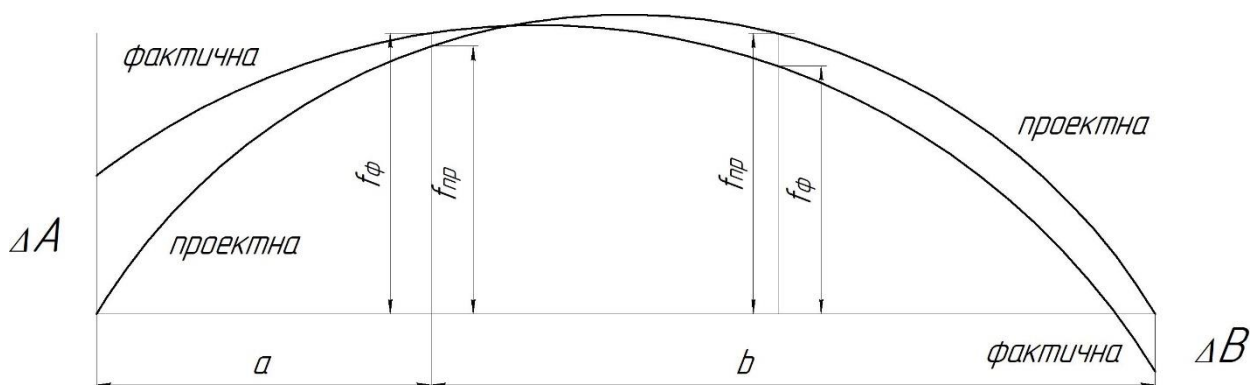


Рис. 2. Визначення стріл вигину на круговій кривій: f_ϕ і f_{np} – фактичні і проектні стріли вигину; ΔA і ΔB – зсуви (рихтування) у точках А і В (кінці хорди); a й b – відстані від проміжної точки до кінців хорди

За відомими зсувами у фіксованих точках за допомогою оптичних або лазерних приладів створюється напрямок проектного розташування хорди, відносно якої вимірюються фактичні стріли вигину.

У фіксованих точках за допомогою закріпленої на залізничній рейці ресчки (лінійки) з поділками відносно робочої грані головки рейки фіксується величина зсуву для переміщення цих точок у проектне положення.

Над однією з отриманих точок встановлюється прилад (спеціальний візир, теодоліт, лазерний генератор), а над іншою точкою – візирна ціль, наведенням на яку здійснюється створення проектного положення хорди. Відносно цієї хорди (лінії візування) з використанням нівелірної рейки визначається фактичне положення рейкової колії в точках розмітки. Величина зсувів у цих точках визначається за формулою

$$\Delta f = f_{\phi} - f_{np}.$$

Якщо зсув Δf позитивний, то рихтування кривої здійснюється усередину, а якщо негативний, то назовні.

Технологія визначення зсувів електронним тахеометром полягає в такому. Визначення рихтувань шляху виконується з попереднім розбиттям кривої на фіксовані ділянки. Розбиття починається з початку або кінця кривої з нумерацією кожної точки. Для кожної точки, зафіксованої згідно з прийнятим інтервалом розбиття, визначають прямокутні координати від тангенсів, а потім у тій самій системі координат виконують детальну зйомку кривої електронним тахеометром і знаходять їхні фактичні координати.

Для зйомки кривої тахеометр встановлюють у початковій точці (початок або кінець кривої), привласнюють їй нульові координати, виконують орієнтування по прямій колії таким чином, щоб дирекційний кут на репер, встановлений у вершині кута, дорівнював нулю. Зйомку можна

виконувати з початкових точок (початок або кінець кривої) або з будь-якої точки, розташованої поза залізничною колією, причому кількість точок стояння тахеометра може бути будь-якою. Розташовуватися ці точки можуть як усередині, так і зовні кривої.

При зйомці кривої з довільної точки після визначення її координат у системі прямокутних координат від тангенсів визначають координати всіх зафіксованих точок на кривій. Для визначення координат точок на кривій бажано мати спеціальну штангу з пристроєм закріплення її на рейці або з фіксацією середини колії. Даний пристрій повинен мати рівень для встановлення штанги у вертикальне положення і гарантувати примусове центрування відбивача над точкою.

Контролем точності визначення координат є рівність теоретичних і фактичних значень абсцис. Величина зсуву визначається за різницею фактичної і проектної ординати.

$$\Delta f = y_{\phi} - y_{np}.$$

Зйомка кривої електронним тахеометром може проводитися детально по всіх точках розбиття або комбінованим способом, коли тахеометром визначаються координати обмеженої кількості точок, між якими зсуви визначаються способом, описаним вище.

Висновки. Існуючі підходи до геодезичного забезпечення планового положення залізничних кривих не забезпечують належну якість утримання цих ділянок залізниць. Шлях, яким можна вирішити проблему, – це створення спеціальних реперних систем на ділянках кривих. Головними точками цієї системи мають стати вершини кутів повороту траси або точки, що дозволяють визначити положення вершини кута.

Створена реперна система в подальшому дозволяє практично виключити геодезичні роботи з поточного

утримання залізничної кривої, зводячи контроль її планового положення до промірювань відстаней від реперів. Наведено розрахунки для визначення величин цих промірів у межах перехідної та кругової кривих і послідовність фіксації значення зсувів у точках кривої для

переміщення цих точок у проектне положення.

Виділено особливості застосування електронних тахеометрів під час приведення залізничних кривих до проектного положення, наведено технологію робіт.

Список використаних джерел

1. Постанова КМ України від 7 серпня 2013 р. № 646 Ін. 70. Деякі питання реалізації частини першої ст. 12 Закону України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» База даних КМ України. URL: [http:// https://www.kmu.gov.ua/npas/246662567](http://https://www.kmu.gov.ua/npas/246662567) (дата звернення: 28.01.2020).
2. Корженевич И. П. Новые способы съёмки железнодорожных кривых. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2006. № 12. С. 53–56.
3. Добрынин Н. Ф., Левицкий А. А. Новый метод определения геометрических характеристик железнодорожного пути по геодезическим данным. *Вестник РГУПС*. 2011. № 1 (41). С. 146-152.
4. Матвеев С. И., Коугия В. А., Цветков В. Я. Геоинформационные системы и технологии на железнодорожном транспорте / под ред. С. И. Матвеева. Москва: УМК МПС России, 2002. 225 с.
5. Корженевич И. П. Точность съёмки плана железнодорожной колеи и пути ее повышения. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2009. № 27. С. 116-120.
6. Корженевич И. П. Специальная реперная система для контроля положения пути в плане. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2008. № 25. С. 69–71.
7. Полетаев В. И., Шкурников С. В., Голубцов В. А. Подготовка железнодорожного пути к работе путевых машин. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2009. № 2. С. 50-60.
8. Полетаев В. И. Состояние и перспективы использования реперной системы железной дороги. *Записки Горного института*. 2004. Т. 156. С. 207-210.
9. Денисов А. В., Рыжик Е. А. Реперная система как способ геодезического обеспечения пути. *Мир транспорта*. 2015. Т. 13. № 6. С. 206–215.
10. Добрынин Н. Ф., Левицкий А. А. Роль реперной системы при строительстве и текущем содержании железных дорог. *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 2. С. 142–145.
11. Vitalii Protsiuk. Georadar technologies application during determination of deformation characteristics of subgrade soils. TRANSBUD-2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 708. Art. №012023. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/708/1/012023 1.

Саяпін Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту.

E-mail: sayarin09@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-9719-6497.

Орел Євген Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-6261-1558.

Камчатна Світлана Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту.

E-mail: Kamchatnayasn@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-5711-4146.

Ужвієва Олена Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту.

E-mail: elena.uzhviieva.72@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-3399-0472.

Oleksandr Saiapin, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

E-mail: sayapin09@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-9719-6497.

Yevhen Orel, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6261-1558.

Kamchatna Svetlana, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

E-mail: Kamchatnayasn@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-5711-4146.

Uzhvieva (Uzhviieva) Elena, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

E-mail: elena.uzhviieva.72@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-3399-0472.

Статтю прийнято 05.02.2020 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.2

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАГОННИХ І ГРУПОВИХ
ВІДПРАВОК НА ОСНОВІ БРОНЮВАННЯ МІСЦЬ У ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДАХ**

Магістрант Н. С. Бантюкова, д-р техн. наук А. В. Прохорченко,
аспірант В. В. Білокудря, канд. техн. наук О. О. Журба, студентка В. В. Дідусенко

**IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR CARRIAGE OF SINGLE WAGON LOAD
AND GROUP SHIPMENTS ON THE BASIS OF RESERVATION OF POSITIONS IN
FREIGHT TRAINS**

Master N. Bantyukova, Dr. Sc. (Tech.) A. Prohorchenko, postgraduate student V. Belokudria,
PhD (Tech.) O. Zurba, student V. V. Didusenko

***Анотація.** У даній статті розглянуто завдання підвищення ефективності перевезень вантажів вагонними та груповими відправками на залізничному транспорті України. Вивчено кількісні та якісні показники експлуатаційної роботи залізничних систем України (АТ «Укрзалізниця») і Швейцарії (SBB-CFF-FFS) для можливості формулювання ефективних пропозицій щодо підвищення ефективності операційної роботи з вагонними і груповими відправками холдингу АТ «Укрзалізниця». Проведено експериментальні дослідження та знайдено раціональний варіант плану формування вагонних і групових відправок з прив'язкою до ниток графіка руху та маршрутів прямування вагонних відправок на довільному графі. Застосування запропонованого підходу дозволить забезпечити прозорість і доступність сервісів з перевезення вагонних відправок і, як наслідок, забезпечить адаптацію технологій до зростаючих вимог логістики.*

***Ключові слова:** залізниця, поїзд, вагонна відправка, планування, бронювання.*

***Abstract.** This article explores the problem of increasing the efficiency of freight transportation by single wagon load and group shipments on Ukrainian railways. It is proposed to improve the process of scheduling transportation based on booking seats in freight trains. Quantitative and qualitative indicators of the operational performance of the railway systems of Ukraine (Ukrainian railway) and Switzerland (SBB-CFF-FFS) have been studied, with the aim of formulating effective proposals for improving the efficiency of operating work with rail and group shipments of Ukrainian railway holding. The model of the phase movement of freight trains for carriage of freight carriages in the SBB-CFF-FFS network is investigated. The functions of the "CIS-Online" system for booking of seats in a freight train for the planning of transportation by wagon and group shipments are analyzed. In order to increase the efficiency of the technology of carriage of single wagon load and group shipments on the railway network of Ukraine, it is proposed to formalize the technology of carriage of wagon shipments between stations with the possibility of booking seats in trains. An advanced mathematical model that minimizes the cost of train traffic and shunting work on the railway network, taking into account restrictions on the capacity of stations, the processing capacity of stations and the maximum number of wagons in the train. Experimental researches have been*

carried out and a rational variant of the plan of formation of single wagon load and group shipments has been found, and the timetable and routes of the train carriage on an arbitrary graph are attached to the threads. The application of the proposed approach will allow for the transparency and accessibility of freight carriage services and, as a consequence, will adapt the technology to the growing demands of logistics.

Keywords: railway, train, single wagon load, planning, booking.

Вступ. В умовах кризових явищ з економікою України відбуваються структурні зміни в попиті на вантажні перевезення на залізничному транспорті України. На фоні збільшення державних інвестицій у розвиток автошляхів і зростання точності та швидкості автомобільних вантажних перевезень обсяги вантажів, що можуть перевозитись у вагонних і групових відправках, зменшуються, а залізниця в умовах невизначеності перевізного процесу стає неконкурентоспроможною. Причиною відсутності прогнозованості тривалості перевезень вантажів вагонними відправками є низький рівень надійності перевізного процесу. На невизначеність значно впливає дефіцит магістральної локомотивної тяги в мережі та критичний рівень його зношення, однак аналіз експлуатаційної роботи доводить відсутність ефективних заходів з підвищення якості планування перевезень. Одним із напрямів підвищення ефективності перевезень вантажів у вагонних і групових відправках є зміна концепції операційної моделі їх перевезень на основі цифровізації процесів планування перевезень з можливістю бронювання місць у складах поїздів у межах заздалегідь розрахованого плану формування поїздів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Планування та експлуатація систем залізничного транспорту є надзвичайно важким завданням через комбінаторну складність основних дискретних проблем оптимізації і технічні тонкощі. Однак, використовуючи математичні моделі та методи оптимізації, можна отримати значні вигоди як клієнтам залізниць, так і самій залізниці, наприклад у плані зниження витрат або покращення

якості послуг. Математичні та оптимізаційні моделі можуть призвести до підвищення ефективності роботи залізниць і служать потужним та інноваційним інструментом для вирішення останніх проблем залізничної галузі [1]. Досвід на залізницях світу застосування математичного моделювання в процесах планування перевезень вагонних і групових відправок є досить значним і доводить ефективність прийнятого підходу [2]. Наприклад, у роботі [3] запропоновано евристичний алгоритм на базі еволюційних обчислень для розв'язання задачі ув'язки вагонних відправок у поїзди з визначеними розкладами відправлення в мережі. Одним із передових досвідів підвищення якості планування вагонної відправки є досвід компанії-перевізника SBB Cargo у Швейцарії [4]. Сервісний продукт за назвою Cargo Express компанії-перевізника SBB Cargo Швейцарської федеральної залізниці (SBB) налаштований за моделлю «hub-and-spoke», де вантажні поїзди перевозять вантажі протягом ночі зі станцій навантаження до станцій призначення. Для цього вагони формують у поїзди, які прямують між опорними сортувальними станціями без переробки. Для побудови ефективних планів формування застосовуються різні математичні моделі. У роботі [5] проблеми маршрутизації та оптимізації вирішуються за допомогою трьох різних оптимізаційних моделей планування роботи служби в цілому. Усі моделі вирішують завдання з високим рівнем деталізації: маршрутизація руху, складання розкладу для поїздів, поїздоутворення та прив'язка локомотивів на мережі. У той же час дотримуються жорсткі обмеження, такі як обмеження на терміни експлуатації локомотивів і поїздів,

на перевантаження сортувальних станцій тощо [6].

Цікавим є метод приєднання термінових відправок до регулярних поїздів. Це може відбуватися за допомогою скоординованої оптимізації призначень термінових вантажів на мережі залізничних послуг.

Цікавим є підхід у роботі [7], що виходить з можливості повного використання максимальної місткості составів вантажних поїздів. Запропоновано математичну модель приєднання вагонів до поїздів за розкладом. Мета цього методу полягає в тому, щоб отримати максимальний прибуток від перевезення залізницею термінових вантажів. На залізницях США перевезення вантажів вагонними відправками перевищує половину загальних обсягів перевезень залізницею. Для зменшення переробок вантажних вагонів на сортувальних станціях мережі запропоновано поєднувати в групи (блоки) вагонів для утворення більш далеких наскрізних призначень у межах плану формування поїздів. Був розроблений алгоритм, що використовує нову техніку, відому як великомасштабний пошук (VLSN), здатний вирішити проблему максимальної оптимальності, використовуючи одну-дві години роботи на звичайному комп'ютері вантажної станції [8]. Застосування розробленого алгоритму на основі оптимізації колоній мурах у роботі [9] дозволило ефективно розраховувати місця вагонних відправок у зв'язаних між собою нитках графіка руху вантажних поїздів на всій залізничній мережі.

Визначення мети та завдання дослідження. Дана робота має на меті вивчити світовий досвід удосконалення технології перевезень вагонних і групових відправок на основі формалізації технології розрахунку плану формування поїздів з можливістю бронювання місць у составах поїздів. Для досягнення даної мети у статті поставлено завдання проаналізувати роботу залізничних систем України та Швейцарії,

зокрема в частині перевезень вантажів вагонними відправками, і розробити технології планування на основі удосконалення математичної моделі, що дозволяє мінімізувати витрати на рух поїздів і маневрову роботу на залізничній мережі з урахуванням обмежень на пропускну спроможність дільниць, переробну спроможність станцій і максимальну кількість вагонів у составі поїзда.

Основна частина дослідження. Для дослідження проблем залізничної системи важливим є проведення аналізу її експлуатаційних і економічних показників. Наразі АТ «Укрзалізниця» забезпечує 80,1 % транспортної роботи в загальній структурі перевезень вантажів всіма видами транспорту (без урахування трубопровідного транспорту) і 32,1 % пасажирських перевезень. Швейцарські федеральні залізниці SBB-CFF-FFS мають частку ринку вантажних перевезень 37,3 % загальної транспортної роботи в країні і 17 % пасажирських перевезень. Зовсім інші фінансові результати залізничних холдингів. Дохід АТ «Укрзалізниця» за 2018 рік склав 76 млрд грн, тоді як чистий прибуток становив 203,9 млн грн. SBB-CFF-FFS за 2018 рік мали дохід CHF 8,451 млрд швейц. фр., а чистий прибуток склав CHF 568 млн швейц. фр. Враховуючи, що для АТ «Укрзалізниця» основні доходи приносять вантажні перевезення, важливим є пошук ефективних технологій перевезень вантажів для зменшення витрат компанії та досягнення більших прибутків.

Для можливості формування ефективних пропозицій щодо підвищення ефективності операційної роботи з вагонними і груповими відправками холдингу АТ «Укрзалізниця» в роботі запропоновано детально дослідити кількісні та якісні показники експлуатаційної роботи залізничних систем України і Швейцарії. Порівняльний аналіз показників операційної діяльності SBB-CFF-FFS дозволить виявити причини неефективності технологій перевезень вагонних відправок на

мережі АТ «Укрзалізниця». Загальна протяжність залізничної мережі Швейцарії досягає 4035,5 км, тоді як експлуатаційна протяжність головних колій в Україні – 21640,4 км. Цікавим є порівняльний аналіз обсягів перевезених вантажів на залізницях України та Швейцарії. Аналіз показників доводить, що обсяги вантажних перевезень

у залізничних системах є співставними. На залізниці Швейцарії спостерігається тренд падіння вантажних перевезень на 9,5 % порівняно з 2017 роком, аналогічна ситуація спостерігається в Україні, за останні 5 років обсяги перевезень скоротились на 10 % (рис. 1).

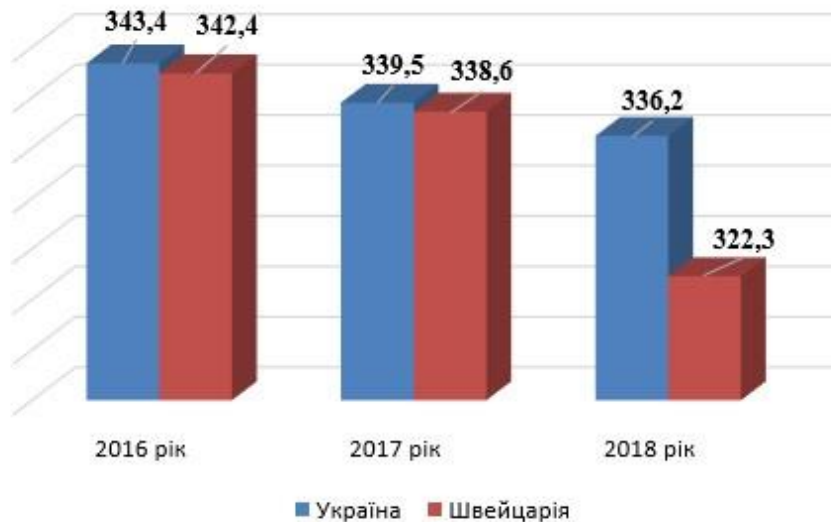


Рис. 1. Кількість перевезених вантажів, млн т, на залізниці України (АТ УЗ) і залізниці Швейцарії (AG SBB)

На зниження показників обсягів перевезень на мережі АТ «Укрзалізниця» вплинули такі фактори:

- відсутність локомотивного парку;
- відсутність компенсацій від держави за пасажирські перевезення;
- зношеність основних виробничих фондів компанії;
- зниження частки транзитних перевезень вантажів;
- ступінь використання технічних засобів;
- надлишкова кількість сортувальних систем;
- великі витрати при перевезеннях вагонних і групових відправок.

Аналізуючи розвиток вагонної відправки в Україні, можна виявити, що станом на 2018 рік дана частка складає 65 % усіх вантажних перевезень, а маршрутна

35 %, тоді як на залізниці Швейцарії вагонна відправка досягає 16 %, а маршрутна – 84 %, що вказує на покращену роботу залізничної системи (рис. 2) [10].

У 2017 році менеджмент компанії SBB Cargo [11], що є дочірньою компанією холдингу SBB-CFF-FFS, підтвердив, що модель організації перевезень вантажів вагонними відправками є стратегічним бізнесом компанії. Новий підхід базується на формуванні вагонних і групових відправок у поїзди і здійсненні їх руху по мережі на основі зменшення впливу на пікові фази руху пасажирських поїздів. Для вантажних перевезень шукається новий графік руху зі щоденними трьома фазами (рання фаза, час пік, вантажний рух). Фази руху вантажних поїздів розташовані так, що вони не впливають на рух пасажирських поїздів у ранкові та вечірні години пік [12].

Це дозволяє зменшити вплив пасажирських поїздопотоків на вантажні і, як наслідок, підвищити точність доставки вантажів

вагонними відправками та зменшити невизначеність перевізного процесу (рис. 3).

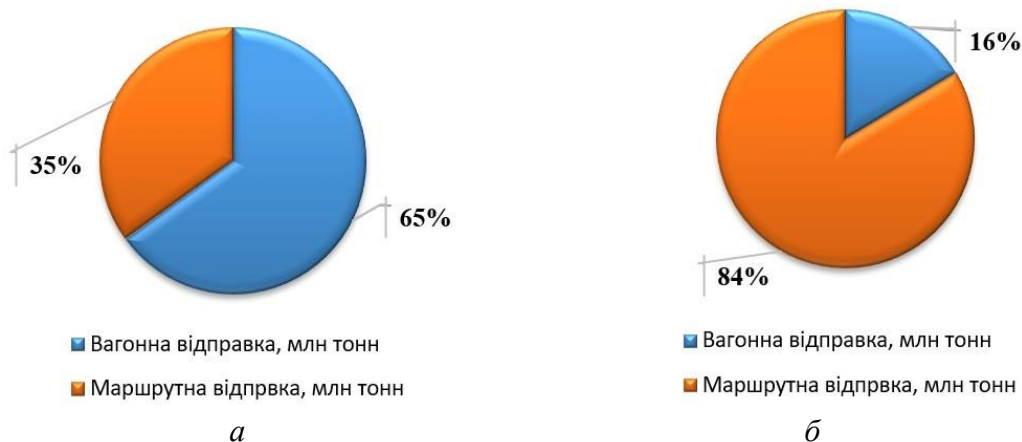


Рис. 2. Частка вагонної відправки в загальних обсягах перевезень за 2018 рік: *а* – на залізниці України (АТ УЗ); *б* – на залізниці Швейцарії (AG SBB)

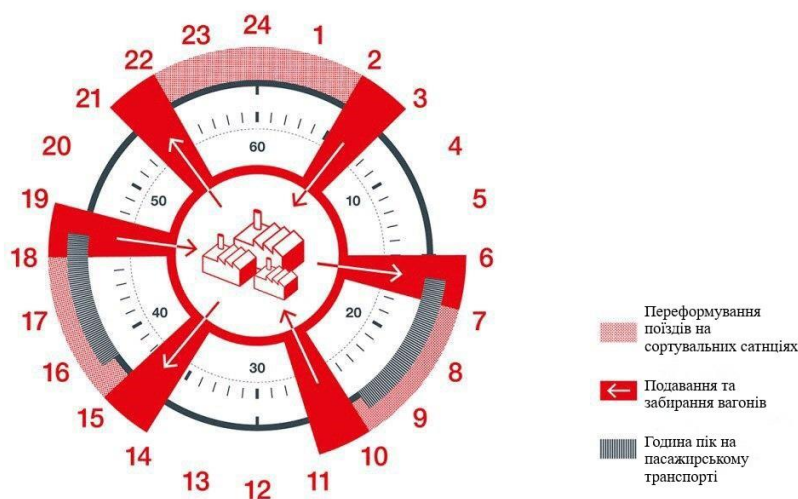


Рис. 3. Графік роботи залізничної мережі SBB-CFF-FFS з фазами руху поїздопотоків

З точки зору транспортного часу, залізничний транспорт порівняно з автомобільним стає більш конкурентоспроможним. Застосування описаної вище технології перевезень вантажів вагонними і груповими відправками компанією-перевізником SBB Cargo на залізниці Швейцарії дозволяє зменшити витрати на операційну діяльність і, як наслідок, підвищити прибуток. Новий розклад встановлено таким чином, щоб

уникати перевантаження залізничної мережі. У межах фазового розкладу руху між основними сортувальними станціями та станціями навантаження/вивантаження запропонована можливість за допомогою системи CIS-Online бронювати місце у вантажному поїзді для вантажів, що плануються до перевезення вагонними і груповими відправками.

Відповідно до проаналізованої практики удосконалення технології перевезень вагонних і групових відправок на залізничній мережі SBB-CFF-FFS у даному дослідженні запропоновано формалізувати технологію розрахунку плану формуванням поїздів з можливістю бронювання місць у складах поїздів для залізничної системи України. Для досягнення даної мети в роботі запропоновано формалізувати технологію планування поїздутворення та руху вагонних відправок між станціями мережі.

Відповідно до поставленого завдання в роботі удосконалено математичну модель, що дозволяє мінімізувати витрати на рух поїздів і маневрову роботу на залізничній мережі з урахуванням обмежень на пропускну спроможність дільниць, переробну спроможність станцій і максимальну кількість вагонів у складі поїзда [3]. Для просторового представлення плану руху вагонних і групових відправок запропоновано розглядати граф мережі плану формування вагонних відправок відповідно до заданого графіка руху поїздів $J(P, B)$, де P – множина технічних станцій, на яких відбувається причеплення/відчеплення вагонних відправок, або станція навантаження вагонної відправки згідно з наданими заявками вантажовідправників. Індекс k використовується для позначення конкретної станції; B – множина можливих ниток графіка у мережі $P \times P$, тобто дуга графа $(k, m) \in B$, якщо нитка може бути побудована з пункту k до пункту m .

Для формалізації технології розрахунку плану формуванням поїздів з можливістю бронювання місць у складах поїздів введемо такі параметри математичної моделі:

$t^{arrive}(k)$ – кількість ниток графіка, що прибувають до k ;

$t^{deport}(k)$ – кількість ниток графіка, що відправляються з k ;

N – множина заявок вантажовідправників, індекс n використовується для позначення вантажу;

$h(n)$ – пункт відправлення вагонної відправки $n \in N$;

$r(n)$ – пункт прибуття вагонної відправки $n \in N$;

W_h – кількість вагонів у відправці або групі $n \in N$;

v_{km} – вартість перевезення в мережі $(k, m) \in B$. У загальному випадку вартість пропорційна довжині дільниці;

C_k – вартість сортування вагонів у пункті $k \in P$;

z_{km} – максимальна кількість вагонів, що може бути перевезено в мережі (провізна спроможність дільниці) $(k, m) \in B$, ваг;

f_k – максимальна кількість вагонів, яка може бути оброблена в пункті, $k \in P$ – переробна спроможність технічної станції, ваг. Застосування моделі можливе для кожного типу продукту (вагона), але тільки для одного з них. Тому задля спрощення пропонується не застосовувати індекс типу вагонної відправки;

a_k – максимальна кількість вагонів у складі поїзда, у якому можливе бронювання місця вагонної відправки на станції $k \in P$, ваг.

Завдання побудови плану поєднання вагонної відправки у склад поїзда має два набори змінних y_{km} та x_{km}^n . Варіант y_{km} набуває значення 1, якщо прийнято рішення використати нитку графіка (забронювати місце в складі поїзда) з пункту k до m на дільниці $(k, m) \in B$ у визначений час згідно з заданим розкладом, і дорівнює 0 в іншому випадку. Змінна x_{km}^n дорівнює W_n , якщо вагонна відправка n прямує напрямком $(k, m) \in B$, в іншому випадку дорівнює 0.

Завдання побудови плану поєднання вагонної відправки у состав поїзда для можливості розрахунку прийняттого плану

формування для бронювання замовником місць у составах поїздів наведено нижче:

$$F = \sum_{n \in N} \sum_{(k, m \in B)} v_{km} x_{km}^n + \sum_{k \in P} \sum_{n \in N} \sum_{(km) \in f^{arrive}(k)} c_k x_{km}^n \rightarrow \min \quad (1)$$

за умови

$$\sum_{(km) \in f^{arrive}} x_{km}^n - \sum_{(km) \in f^{deport}} x_{km}^n = \begin{cases} w_n, \text{ якщо } o_k = 0(n) \\ 0, \text{ якщо } o_k = 0(n) \text{ або } f(n) \\ -w_n, \text{ якщо } o_k = f(n) \end{cases} \quad (2)$$

для всіх $n \in N$,

$$\sum_{n \in N} x_{km}^n \leq z_{km} y_{km} \text{ для всіх } (km) \in B, \quad (3)$$

$$\sum_{(km) \in f^{arrive}(k)} y_{km} \leq a_k \text{ для всіх } k \in P, \quad (4)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{(km) \in f^{deport}(k)} x_{km}^n \leq f_k \text{ для всіх } k \in P, \quad (5)$$

$$y_{km} = 0 \text{ або } 1 \text{ для кожного } (k, m) \in B \text{ та } x_{km}^n = 0 \text{ або } w_n,$$

$$\text{для всіх } (k, m) \in B \text{ та всіх } n \in N. \quad (6)$$

У наведеному описі математичної моделі обмеження (2) і (6) гарантують, що вагонна відправка прямує за нитками між сортувальними станціями від місця навантаження до місця призначення. Обмеження (3) гарантує, що відправка може прямувати довшим шляхом, якщо на ньому є обслуговування, або є доречним приєднання іншої вагонної відправки до состава поїзда, або пропускна спроможність менша чи дорівнює потрібній. Обмеження (4) встановлює кількість ниток графіка, створених для станції, а обмеження (5) встановлює кількість вагонів, яку станція спроможна прийняти/відправити.

Розв'язання вищенаведеної оптимізаційної математичної моделі дає оптимальний план поєднання вагонної

відправки та мінімізування витрати на рух поїздів на залізничній мережі, що дозволить користувачам у межах інтерфейсу інформаційної системи швидко бронювати місця на визначений час відправлення поїзда з деталізацією плану перепричеплень на всьому шляху перевезень. Для перевірки адекватності і точності формалізованої технології в роботі запропоновано програмно реалізувати дану математичну модель з можливістю її розв'язання методом генетичного алгоритму в середовищі Scilab [13]. Динаміку зміни фітнес-функції генетичного алгоритму (penalty value) від кількості ітерацій генетичного алгоритму наведено на рис. 4.

Результат моделювання на графі мережі наведено на рис. 5, а, б.

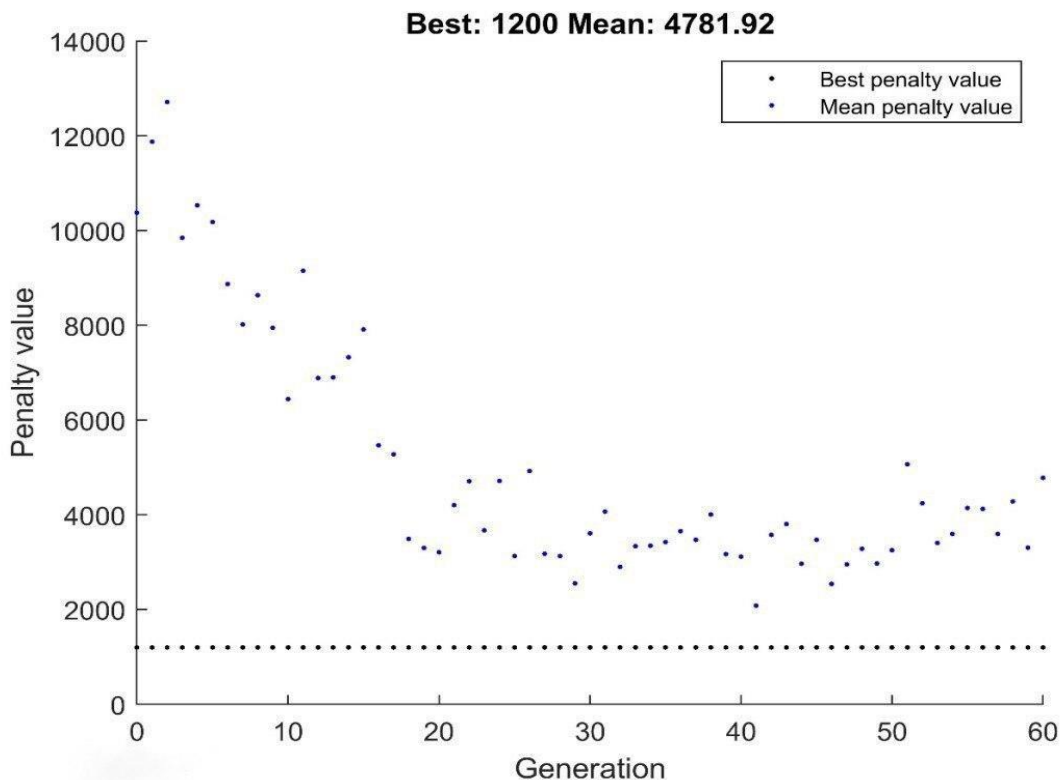


Рис. 4. Графік залежності значень фітнес-функції генетичного алгоритму (penalty value) від кількості ітерацій процедури оптимізації плану формування вагонних відправок генетичного алгоритму

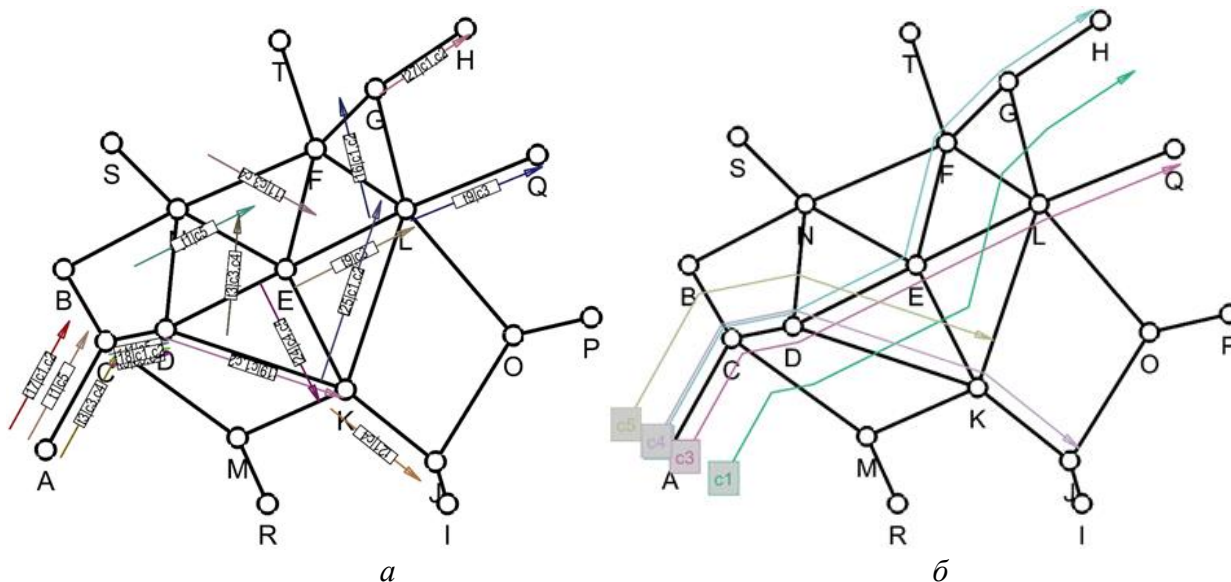


Рис. 5. Візуалізація результатів розрахунку на довільному графі мережі G :
a – знайдений раціональний варіант плану формування вагонних і групових відправок з прив'язкою до ниток графіка руху; *б* – знайдені маршрути прямування вагонних відправок, що були задані до початку розрахунку

Аналіз знайденого оптимального варіанта поїздутворення з вагонних і групових відправок для можливості бронювання місць у складах поїздів доводить адекватність розробленої моделі шляхом співставлення з логікою побудови ПФП експертним шляхом.

Висновки. Таким чином, впровадження підходу щодо удосконалення технології перевезень вагонних і групових відправок на основі формалізації технології розрахунку плану формуванням поїздів з

можливістю бронювання місць у складах поїздів дозволить АТ «Укрзалізниця» підвищити конкурентоспроможність технології перевезень вагонної та групової відправки в довгостроковій перспективі та зменшити ризики в перевізному процесі для вантажовідправника. Перевезення вагонних і групових відправок стають більш прозорими і ґрунтуються на вимогах клієнта, що дозволяє адаптувати технології перевезень залізниці до зростаючих вимог логістики.

Список використаних джерел

1. Borndorfer R., Lamorgese L., Reuther M., Mannino C. Recent success stories on integrated optimization of railway systems. *Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin*. 2017. P. 196–211.
2. Prokhorchenko A., Parkhomenko L., Kyman A., Matsiuk V., Stepanova J. Improvement of the technology of accelerated passage of low-capacity car traffic on the basis of scheduling of grouped trains of operational purpose. *Procedia Computer Science*. 2019. P. 86-94.
3. A population-based algorithm for the railroad blocking problem. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/2251-712X-8-8> (last access: 24.12.2019).
4. Optimizing the Cargo Express Service of Swiss Federal Railways. URL: http://www.redaktion.tuberlin.de/fileadmin/i26/download/AG_DiskAlg/FG_KombOptGraphAlg/preprints/2006/Report-028-2006.pdf. (last access: 24.12.2019).
5. Optimization of a Railway Hub-and-Spoke System Routing and Shunting. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/69341> (last access: 26.12.2019).
6. Ceselli A., Lubbecke M., Gatto M., Nunkesser M. Optimizing the Cargo Express Service of Swiss Federal Railways. 2008. P. 450–465.
7. A Study of the Car-To-Train Assignment Problem for Rail Express Cargos in the Scheduled and Unscheduled Train Services Network. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30303993/> (last access: 28.12.2019).
8. Ravindra K., Krishna C., Jian L. Solving Real-Life Railroad Blocking Problems. *Inform's journal on applied analytics*. 2007. P. 401–499.
9. Yaghini M., Foroughi A., Nadjari B. Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm. *Applied Mathematical Modelling*. 2011. P. 5579–5591.
10. Прохорченко А. В., Бантюкова Н. С., Пашко Ю. М. Порівняльний аналіз операційних показників залізничних систем України та Швейцарії. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Наук.-техн. журнал. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 32. С. 18.
11. Прохорченко А. В., Бантюкова Н. С. Нова концепція операційної моделі залізничних перевезень для вагонних і групових для залізничного транспорту України. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Наук.-техн. журнал. Харків. УкрДУЗТ, 2018. Вип. 31. С. 45-46.
12. Heydenreich T., Lahrmann M. How to save wagonload freight. *Railway Gazette International*. 2010. P. 126-129.

13. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польск. И. Д. Рудинского. Москва: Горячая линия–Телеком, 2004. 452 с.

Бантюкова Наталя Сергіївна, магістрант, група 11-Пм-ТТ Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 0938490798. E-mail: bantyukovanata@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-4578-3446.

Проخورченко Андрій Володимирович, доктор технічних наук, професор кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 0666357601. E-mail: andrii.prokhorchenko@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3123-5024.

Білокудря Володимир Валерійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-88. E-mail: v.belokudrya@bigmir.net. ORCID ID: 0000-0001-5632-618X.

Журба Олег Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державний університет “Житомирська політехніка”. Тел. (057)730-10-88. E-mail: zhurbaoo@gmail.com.

Дідусенко Вікторія Володимирівна, студентка групи 17-III-ОМП Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 0509386009. E-mail: vvictoria.di@gmail.com.

Bantyukova Natalia, master, Group 11-Pm-TT, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 0938490798. E-mail: bantyukovanata@gmail.com. ORCID ID: 0000-0002-4578-3446.

Prokhorchenko Andrii, D. Sc. (Tech.), professor, Department of Railway Operation and Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. 0666357601. E-mail: andrii.prokhorchenko@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3123-5024.

Belokudria Volodymyr, postgraduate student, Department of Railway Operation and Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-88. E-mail: v.belokudrya@bigmir.net. ORCID ID: 0000-0001-5632-618X.

Zhurba Oleg, PhD (Tech.), associate professor, Departments of Automobiles and Transport Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University. 0634624149. E-mail: zhurbaoo@gmail.com.

Didusenko Victoria Vladimirovna, student group 17-III-OMP Ukrainian State University of Railway. Tel: 0509386009. E-mail: vvictoria.di@gmail.com.

Статтю прийнято 10.02.2020 р.

УДК 656.212.5

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЦЕДУРИ РОЗРАХУНКУ ВИТРАТ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА І ЧАСУ НА ВИКОНАННЯ МАНЕВРОВОГО НАПІВРЕЙСУ НА БЕЗГІРКОВИХ СОРТУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ

Д-р техн. наук О. М. Огар, канд. техн. наук М. Ю. Куценко, магістранти М. М. Верховод, Ю. С. Старинцева, студентка А. В. Топчій

DEVELOPING THE PROCEDURE OF DIESEL FUEL CONSUMPTION AND TIMING CALCULATION FOR A SHUNTING HALF-RUN IN FLAT MARSHALLING YARDS

D. Sc. (Tech.) O. Ogar, PhD (Tech.) M. Kutsenko, master M. Verkhovod, master Y. Staryntseva, student A. V. Topchiy

Анотація. Обґрунтовано необхідність розроблення процедури розрахунку витрат дизельного палива на маневрові пересування і тривалості виконання маневрових напівреїсів. Зазначено переваги застосування безгіркових сортувальних пристроїв з точки зору якості сортувального процесу. Сформовано узагальнену процедуру розрахунку витрат палива і часу на виконання маневрових пересувань. Отримано результати моделювання маневрового напівреїсу для розрахункового состава. Обґрунтовано доцільність оптимізації позиції

контролера машиніста для кожного маневрового напіврейсу і шляху, що має пройти состав за інерцією і з гальмуванням.

Ключові слова: сортувальний пристрій, дизельне паливо, процедура розрахунку, маневровий напіврейс.

Abstract. By today, the prerequisites for the design of marshalling devices have hardly changed in comparison with the standards applied in the last century. These standards were determined by comparing the reduced costs of design solutions with the prices that existed at that time. Current pricing policies and operating conditions are dramatically different. This is especially the case with the structure of the car fleet, the technical means used for car handling, and, most importantly, the cost of idle time of cars at stations, as well as the cost of fuel and energy resources.

Thus, determining the amount of handling when it is advisable to use flat marshalling yards is an urgent scientific and applied problem, which cannot be solved without developing a procedure for calculating the duration of shunting half-runs and the diesel fuel consumption for shunting movements.

In order to determine the amount of handling for which it is economically feasible to use flat marshalling facilities together with backward movement, diesel fuel consumption and the duration of shunting half-runs should be primarily calculated. These indicators are decisive in the feasibility study of the use of a sorting facility.

To develop a procedure for calculating diesel fuel costs and duration of shunting half-runs, the type of shunting half-run is selected, which contains the following elements: acceleration, steady predetermined speed, inertia motion, and braking (if necessary).

To estimate the diesel fuel consumption and the duration of a shunting half-run, an estimated train was made up. Rational positions of the driver's controller and the rational length of the path the train passes by inertia and with braking are determined for the movement of this train.

The developed procedure for calculation of diesel fuel consumption and timing of a shunting half-run can be used to determine the range of handling volumes, for which the use of flat sorting facilities and uncoupling of trains only by backward movement is economically justified. It should also be noted that in order to minimize operating costs for the execution of technological operations, the rational position of the driver's controller for each shunting half-run and the path to be travelled by the shunting train by inertia and with braking should be determined. The substantiated design conditions for flat marshalling devices can be applied in the new edition of the Ukrainian industry building codes.

Keywords: marshalling facility, diesel fuel, calculation procedure, shunting half-run.

Вступ. Згідно з галузевими будівельними нормами України [1] тип сортувального пристрою визначається на підставі прогнозних обсягів переробки вагонопотоків на відповідний рік експлуатації. На сьогодні діючі умови проектування зазначених пристроїв майже не змінилися порівняно з нормами, що застосовувались у ХХ ст. Ці норми визначались шляхом порівняння приведених витрат конструкційних рішень за цінами, що мали місце на той момент. Сучасні цінова політика та умови

експлуатації суттєво відрізняються. Особливо це стосується структури вагонного парку, технічних засобів, що використовуються для переробки вагонів і, головне, вартості простою вагонів на станціях і вартості паливно-енергетичних ресурсів. АТ «Укрзалізниця», як відомо, є одним з основних споживачів цих ресурсів. При цьому частка витрат на дизельне паливо при проведенні маневрових операцій на залізничних станціях України складає приблизно 30 %.

Таким чином, визначення обсягів переробки, при яких доцільно використовувати безгіркові сортувальні пристрої, є актуальним науково-прикладним завданням, вирішення якого неможливо без розроблення процедури розрахунку тривалості виконання маневрових напіврейсів і витрат дизельного палива на маневрові пересування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд відомих підходів до розрахунку витрат дизельного палива і часу на виконання маневрових пересувань довів, що цьому питанню приділено недостатньо уваги.

У роботі [2] нормування витрат дизельного палива на маневрову роботу здійснено шляхом дослідних поїздок. Годинні витрати палива визначено залежно від температурних умов і величини виконання плану з кількості перероблених вагонів. Суттєвими недоліками даних норм є відсутність нормування витрат палива для конкретного типу напіврейсу, відсутність урахування структури вагонопотоку і конструктивних особливостей залізничних станцій. Методика дозволяє виконати лише приблизні розрахунки витрат палива.

У роботі [3] побудовано імітаційну модель роботи сортувальної станції з використанням системи моделювання AnyLogic. Автори при моделюванні маневрової роботи, що виконується з використанням витяжної колії, ураховують не тільки тривалість руху зі швидкістю, що встановилася, а й кількість вагонів у маневровому составі, тривалість розгону та уповільнювання. Процедури розрахунку витрат палива не розглядалися.

У роботі [4] запропоновано розрахунок витрат палива здійснювати шляхом розв'язання диференціального рівняння руху маневрового состава. Моделювання маневрового пересування здійснюється відповідно до конкретних умов: враховуються основні особливості маневрової роботи (безперервність зміни плану та профілю колії, стрілочних

переводів та ін.). Таким чином, чисельне розв'язання вказаного рівняння дозволяє отримати достатньо точні результати розрахунків. Слід також зазначити, що з метою підвищення точності опису реальних умов роботи модель має можливість включення до неї додаткових елементів. Разом із тим у роботі [4] не зазначено, за яким алгоритмом задавалися позиції контролера машиніста при виконанні маневрового напіврейсу.

У роботі [5] для спеціалізованої обчислювальної підсистеми планування маневрової роботи на залізничному транспорті промислових підприємств було розроблено методика збору й обробки необхідної інформації з використанням інформаційно-структурної моделі. Як інструмент інформаційної технології багатофакторного прогнозування тривалості маневрових операцій була обрана методика тягових розрахунків, адаптована під умови промислового залізничного транспорту. Це дозволило застосувати процедуру, що враховує тип маневрового напіврейсу і зміну сили тяги локомотива залежно від позиції контролера машиніста. Запропонована процедура дає можливість отримати точні часові та паливні витрати при відомій довжині напіврейсу. Разом з цим у роботі [5] доведено, на яких позиціях контролера машиніста мають місце найменші витрати дизельного палива, однак при цьому не зазначено, яких саме моделей маневрових локомотивів це стосується.

У роботах [6-8] теж запропоновано моделі для розрахунку витрат паливно-енергетичних ресурсів на виконання маневрових операцій, однак вони зорієнтовані на гіркові технологічні процеси.

У роботі [9] запропоновано процедуру змішаної цілочисельної лінійної програми, яка дозволяє вирішити проблему пересортування вагонів на станції з використанням безгіркових сортувальних пристроїв. На основі моделювання були мінімізовані загальні витрати при

проведенні маневрових операцій за рахунок зменшення часу на сортування залежно від параметрів плану і профілю сортувальної станції та кількості вагонів різних типів. Однією з цілей роботи є зниження експлуатаційних витрат на критично важливий ресурс, що використовує маневровий локомотив. Але робота більш зорієнтована на пересортування вагонів за рахунок зменшення кількості маневрових напіврейсів.

У роботі [10] розглядаються проблеми моделювання роботи сортувальної станції. Акцент робиться на побудову віртуального вузла (комп'ютерна модель реального вузла) і моделювання роботи в рамках віртуального середовища з використанням програмного пакета VIRTUOS – програмного інструмента, що служить для створення віртуальної сортувальної станції і віртуальних потоків поїздів. Контролювати роботу моделі можна візуально (всі дії анімовані та виводяться на екран) у реальному часі. Система може розпізнавати і використовувати технічну документацію, створену в AUTOCAD. Таким чином, імітаційно можна збільшити пропускну спроможність сортувальних пристроїв. Однак у роботі не наведено процедури для вирішення цих завдань.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даного дослідження є підвищення точності розрахунку витрат паливних ресурсів і тривалості виконання маневрових пересувань при розформуванні составів на безгіркових сортувальних пристроях. У подальшому це дозволить отримати об'єктивну оцінку обсягів переробки, при яких доцільно використовувати зазначені пристрої.

Виходячи з мети дослідження, основним його завданням є розроблення процедури розрахунку витрат дизельного палива маневровим локомотивом і часу на виконання маневрового напіврейсу в заданих умовах експлуатації.

Основна частина дослідження. На сьогодні для сортування вагонів на

втяжних коліях застосовують два основних способи: маневри осаджуванням і маневри поштовхами. Перший технологічний спосіб є найменш раціональним, оскільки має найбільші витрати часу на виконання маневрового напіврейсу. Однак у нього є і певні суттєві переваги. Цими перевагами є відсутність «вікон» на коліях сортувального парку, випадків перевищення допустимої швидкості співударяння вагонів і застосування ручної праці регулювальників швидкості руху вагонів, що має місце на сортувальних гірках і при маневрах поштовхами. Таким чином, даний спосіб забезпечує найбільшу якість сортувального процесу.

Для визначення обсягів переробки, при яких економічно доцільно застосовувати безгіркові сортувальні пристрої з використанням маневрів осаджуванням, основну увагу слід звернути на розрахунок витрат дизельного палива і тривалості виконання маневрових напіврейсів. Зазначені показники є одними з вирішальних при техніко-економічному обґрунтуванні застосування того чи іншого сортувального пристрою.

Маневровий напіврейс, як відомо, є поєднанням декількох елементів, до яких належать розгін, гальмування, рух зі швидкістю, що встановилася, і рух за інерцією. Вибір раціонального типу напівресу з точки зору мінімальних сумарних експлуатаційних витрат на дизельне паливо і витрат, пов'язаних з простим рухомого складу, є окремим дослідженням.

Для розроблення процедури розрахунку витрат дизельного палива і тривалості виконання маневрових напіврейсів оберемо тип маневрового напіврейсу, що містить такі елементи: розгін, рух зі швидкістю, що встановилася, рух за інерцією та гальмування (за необхідності). При цьому слід зазначити, що визначення раціональної основної позиції контролера машиніста для розгону і руху зі швидкістю, що встановилася, теж є

важливим завданням з мінімізації зазначених вище експлуатаційних витрат.

Узагальнену процедуру розрахунку витрат дизельного палива (на прикладі тепловоза ЧМЕ-3) при виконанні маневрових напіврейсів на безгіркових сортувальних пристроях і тривалості їх виконання можна представити у такому вигляді:

1) здійснюється введення маси маневрового локомотива (P), кількості осей у локомотиві, маси і кількості завантажених і порожніх чотиривісних вагонів, маси і кількості завантажених і порожніх восьмивісних вагонів, кроку моделювання (ΔS), довжини напіврейсу, шляху, що проходить маневровий состав на першій позиції контролера машиніста (з моменту зрушення його з місця), шляху, що проходить маневровий состав на другій позиції контролера машиніста (з моменту перемикання контролера з першої позиції на другу), основної позиції контролера машиніста, на якій здійснюються розгін маневрового состава і рух зі швидкістю, що встановилася (3-8 позиції для тепловоза ЧМЕ-3), шляху, що проходить маневровий состав за інерцією і з гальмуванням ($S_{in,z}$), максимально допустимої швидкості маневрів, середнього ухилу колій у межах напіврейсу (i);

2) розраховується маса маневрового состава (Q_c) і кількість осей у ньому;

3) розраховується прискорення вільного падіння з урахуванням моменту

інерції мас вагонів і локомотива, що обертаються, (g);

4) розраховується кількість вагонів у маневровому составі, частка завантажених і порожніх чотиривісних і восьмивісних вагонів;

5) визначається середній питомий опір руху маневрового состава на дільниці, де состав рухається за інерцією і з гальмуванням;

б) задаються умови перевірки величини пройденого шляху відповідно на першій, другій та основній позиціях контролера машиніста. Якщо умови не виконуються, залежно від позиції контролера задається величина годинних витрат палива, розраховуються сила тяги локомотива і питомий опір руху маневрового состава, визначається швидкість у кінці кроку моделювання, поточні тривалість виконання маневрового напіврейсу, пройдений шлях і витрати дизельного палива. Якщо умови виконуються, здійснюється перехід до наступних блоків. Після виконання третьої умови розраховується середня тривалість руху состава за інерцією і з гальмуванням до повної його зупинки та виводяться на друк тривалість маневрового напіврейсу і витрати дизельного палива на його виконання.

Для розрахунку сили тяги локомотива тепловоза ЧМЕ-3 $F_k(V)$, кН, де V – швидкість маневрового состава, м/с, пропонується використати такі залежності:

$$F_k(V) = 70,07 \cdot e^{-0,31 \cdot V} \text{ при } n_k = 1; \quad (1)$$

$$F_k(V) = 145 - 22,2 \cdot V \text{ при } n_k = 2 \text{ і } V \leq 1,8; \quad (2)$$

$$F_k(V) = 118,06 \cdot e^{-0,14 \cdot V} \text{ при } n_k = 2 \text{ і } V > 1,8; \quad (3)$$

$$F_k(V) = 230 - 24,4 \cdot V \text{ при } n_k = 3 \text{ і } V \leq 4,3; \quad (4)$$

$$F_k(V) = 214,55 \cdot e^{-0,13 \cdot V} \text{ при } n_k = 3 \text{ і } V > 4,3; \quad (5)$$

$$F_k(V) = 277 - 20,5 \cdot V \text{ при } n_k = 4 \text{ і } V \leq 4; \quad (6)$$

$$F_k(V) = 269,16 \cdot e^{-0,11 \cdot V} \text{ при } n_k = 4 \text{ і } V > 4; \quad (7)$$

$$F_k(V) = 375 - 31,7 \cdot V \text{ при } n_k = 5 \text{ і } V \leq 3; \quad (8)$$

$$F_k(V) = 399,2 \cdot e^{-0,13V} \text{ при } n_k = 5 \text{ і } V > 3; \quad (9)$$

$$F_k(V) = 411,76 - 17,39 \cdot V - 1,74 \cdot V^2 \text{ при } n_k = 6 \text{ і } V \leq 4; \quad (10)$$

$$F_k(V) = 397,34 \cdot e^{-0,08V} \text{ при } n_k = 6 \text{ і } V > 4; \quad (11)$$

$$F_k(V) = 437,08 - 11,7 \cdot V - 1,92 \cdot V^2 \text{ при } n_k = 7 \text{ і } V \leq 4,5; \quad (12)$$

$$F_k(V) = 441,73 \cdot e^{-0,07V} \text{ при } n_k = 7 \text{ і } V > 4,5; \quad (13)$$

$$F_k(V) = 450,72 - 8,49 \cdot V - 1,32 \cdot V^2 \text{ при } n_k = 8 \text{ і } V \leq 6,3; \quad (14)$$

$$F_k(V) = 465,63 \cdot e^{-0,06V} \text{ при } n_k = 8 \text{ і } V > 6,3. \quad (15)$$

Питомий опір руху розраховується за формулою

$$w = w_o(V) + \beta_4^3 \cdot w_4^3(V) + \beta_4^n \cdot w_4^n(V) + \beta_8^3 \cdot w_8^3(V) + \beta_8^n \cdot w_8^n(V), \quad (16)$$

де β_4^3, β_4^n – частка чотиривісних завантажених і порожніх вагонів;

β_8^3, β_8^n – частка восьмивісних вантажених і порожніх вагонів;

$w_o(V)$ – питомий опір руху локомотива, Н/кН,

$$w_o(V) = 1,9 + 0,01 \cdot V + 0,0003 \cdot V^2; \quad (17)$$

$w_4^3(V), w_4^n(V), w_8^3(V), w_8^n(V)$ – питомий опір руху чотиривісних завантажених і порожніх вагонів, восьмивісних завантажених і порожніх вагонів, Н/кН,

$$w_4^3(V) = 0,7 + 4(3 + 0,1 \cdot V + 0,0025 \cdot V^2) / q_4; \quad (18)$$

$$w_4^n(V) = w_8^n(V) = 1 + 0,044 \cdot V + 0,00024 \cdot V^2; \quad (19)$$

$$w_8^3(V) = 0,7 + 8(6 + 0,038 \cdot V + 0,0021 \cdot V^2) / q_8, \quad (20)$$

де q_4, q_8 – середня маса чотиривісних і восьмивісних вагонів, т.

Швидкість маневрового состава в кінці кроку моделювання розраховується за формулою

$$V_k = \sqrt{V_n^2 + 2 \cdot g \cdot \Delta S \cdot \left(\frac{100 \cdot F_k}{P + Q_c} + i - w \right)} \cdot 10^{-3}, \quad (21)$$

де V_n – швидкість маневрового состава на початку кроку моделювання, м/с.

Запропоновану процедуру реалізовано у програмному середовищі Python.

Для оцінювання витрат дизельного палива і тривалості виконання маневрового напіврейсу сформовано розрахунковий состав з кількістю вагонів 37, у тому числі чотиривісних завантажених – 20, чотиривісних порожніх – 7, восьмивісних завантажених – 4 і восьмивісних порожніх – 6.

Керуючись результатами моделювання, що наведені в таблиці, і враховуючи вартість дизельного палива і вартість вагоно-години простою вагонів на станції в процесі переробки, маємо оптимізаційну задачу визначення основної позиції контролера машиніста і шляху, що проходить состав за інерцією і з гальмуванням (рис. 1, 2).

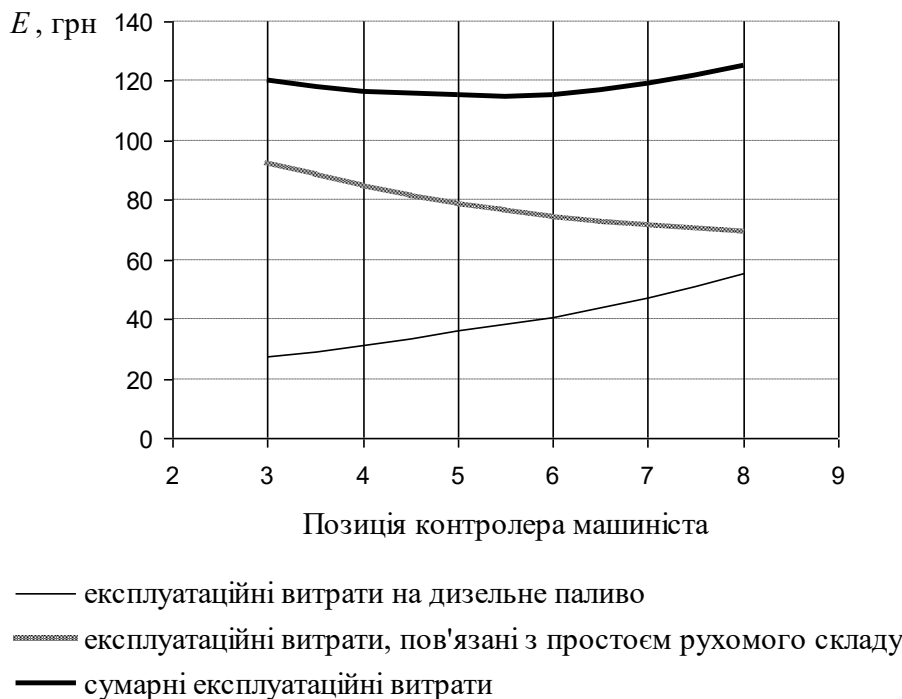


Рис. 1. Залежність сумарних експлуатаційних витрат на дизельне паливо і витрат, пов'язаних з простоем вагонів, від позиції контролера машиніста при довжині напіврейсу 500 м і величині шляху, що проходить маневровий состав за інерцією і з гальмуванням, 280 м

Виходячи з отриманих результатів, слід відзначити таке:

- раціональними позиціями контролера машиніста для пересування розрахункового маневрового состава є четверта і п'ята;
- при четвертій позиції контролера машиніста раціональною величиною шляху, що проходить маневровий состав за інерцією і з гальмуванням, є 120 м, при п'ятій позиції контролера машиніста – 210 м.

Висновки. Розроблена процедура розрахунку витрат дизельного палива і часу на виконання маневрового напіврейсу дає можливість визначити діапазон обсягів переробки вагонів, при якому застосування

безгіркових сортувальних пристроїв з виконанням процесу розформування составів тільки шляхом осаджування є економічно обґрунтованим. Слід також відзначити, що з метою мінімізації експлуатаційних витрат на виконання технологічних операцій необхідно визначити раціональну позицію контролера машиніста для кожного маневрового напіврейсу і раціональну величину шляху, що має пройти маневровий состав за інерцією і з гальмуванням. Обґрунтовані умови проектування безгіркових сортувальних пристроїв можуть бути застосованими в новій редакції галузевих будівельних норм України.

Таблиця

Результати моделювання маневрового пересування при довжині напіврейсу 500 м

Показник	Шлях, що проходить маневровий состав за інерцією і з гальмуванням, м										
	80	105	130	155	180	205	230	255	280	305	330
Третя позиція контролера машиніста											
Витрати дизельного палива, кг	2,21	2,12	2,04	1,96	1,87	1,79	1,70	1,62	1,53	1,44	1,34
Тривалість виконання маневрового напіврейсу, хв	3,95	4,04	4,14	4,24	4,34	4,44	4,55	4,66	4,85	5,09	5,38
Четверта позиція контролера машиніста											
Витрати дизельного палива, кг	2,61	2,52	2,43	2,33	2,24	2,14	2,03	1,92	1,81	1,69	1,57
Тривалість виконання маневрового напіврейсу, хв	3,51	3,59	3,68	3,77	3,87	3,99	4,12	4,27	4,44	4,64	4,89
П'ята позиція контролера машиніста											
Витрати дизельного палива, кг	2,91	2,81	2,70	2,60	2,49	2,37	2,25	2,13	2,00	1,86	1,72
Тривалість виконання маневрового напіврейсу, хв	3,31	3,37	3,45	3,53	3,62	3,73	3,84	3,97	4,13	4,32	4,55
Шоста позиція контролера машиніста											
Витрати дизельного палива, кг	3,43	3,29	3,15	3,02	2,88	2,75	2,61	2,46	2,30	2,14	1,97
Тривалість виконання маневрового напіврейсу, хв	3,20	3,26	3,32	3,38	3,44	3,52	3,63	3,75	3,89	4,07	4,28
Сьома позиція контролера машиніста											
Витрати дизельного палива, кг	4,08	3,91	3,73	3,56	3,38	3,21	3,03	2,86	2,67	2,47	2,26
Тривалість виконання маневрового напіврейсу, хв	3,16	3,22	3,28	3,34	3,40	3,46	3,52	3,62	3,75	3,92	4,13
Восьма позиція контролера машиніста											
Витрати дизельного палива, кг	4,89	4,67	4,44	4,22	4,00	3,98	3,56	3,34	3,11	2,88	2,63
Тривалість виконання маневрового напіврейсу, хв	3,13	3,19	3,25	3,31	3,37	3,43	3,49	3,55	3,64	3,79	3,99

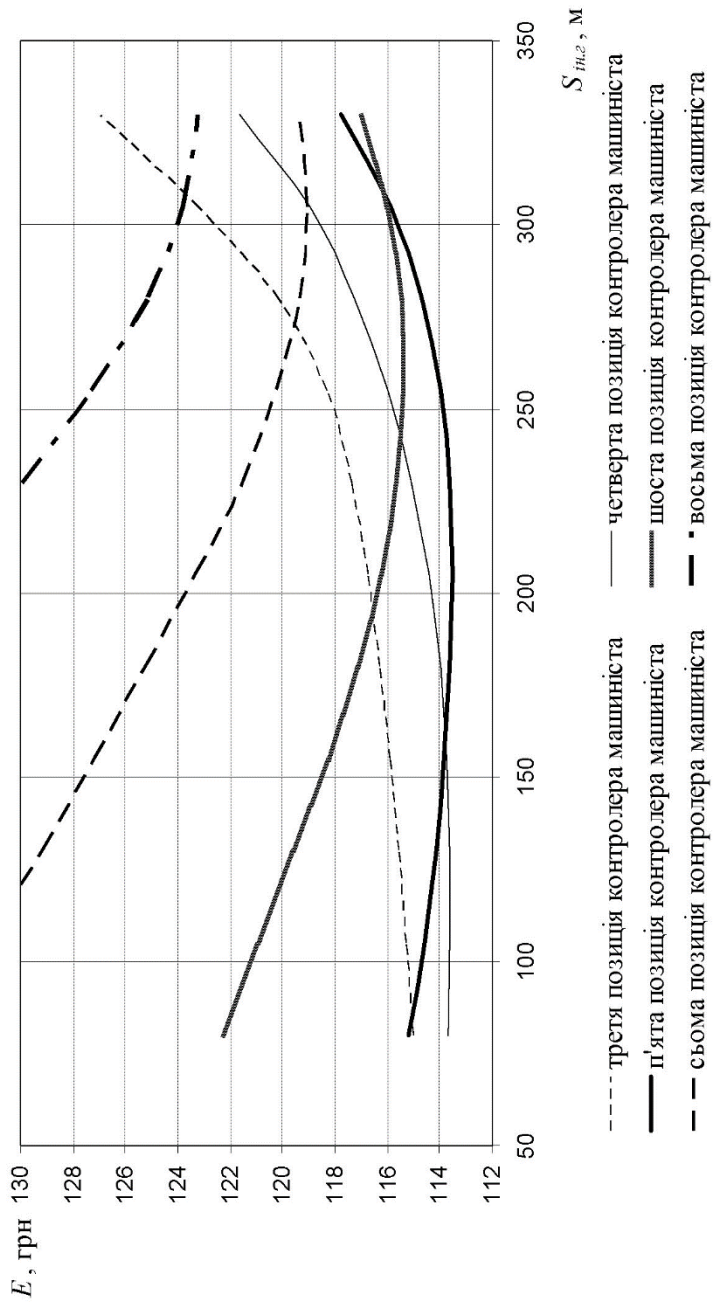


Рис. 2. Залежність сумарних експлуатаційних витрат на дизельне паливо і витрат, пов'язаних з простосм вагонів, від величини шляху, що проходить маневровий состав за інерцією і з гальмуванням, при довжині напіврейсу 500 м

Список використаних джерел

1. Галузеві будівельні норми України. Споруди транспорту. Сортувальні пристрої залізниць. Норми проектування: ГБН В.2.3-37472062-1:2012: затв. Наказом Міністерства інфраструктури України 17.01.2013. № 25. Київ: Міністерство інфраструктури України, 2012. 112 с.
2. Інструкція по технічному нормуванню витрат електричної енергії і палива локомотивами на тягу поїздів. Київ : АТ «Укрзалізниця», 2003. 85 с.
3. Shmulevich M. I., Starikov A. E. Structure of simulation model of industrial railway stations and its implementation in AnyLogic. *Promyshlennyj transport XXI vek*. 2015. № 13 (5). P. 198-212.
4. Овчинников В. М., Пожидаев С. А., Швець Н. Г., Скрежендевский В. В. Сокращение расхода дизельного топлива на маневрах. *Транспортные системы и технологии перевозок*. 2011. № 1. С. 62–70.
5. Нечай Т. В. Модели и алгоритмы специализированной информационно-вычислительной системы для планирования маневровой работы на промышленном транспорте Украины : дисс. ... д-ра техн. наук: 05.22.01. Пенза, 2019. 150 с.
6. Данько М. І. Наукові основи ресурсозберігаючих технологій при організації вантажних залізничних перевезень : дис... д-ра техн. наук: 05.22.01. Харків, 2005. 357 с.
7. Топчієв М. П. Удосконалення технології роботи технічних засобів сортувальних станцій на основі ресурсозбереження: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. Харків, 2004. 246 с.
8. Похилко С. П. Забезпечення ресурсозбереження шляхом удосконалення технології роботи технічних засобів підсистеми розформування сортувальних станцій : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. Харків, 2005. 273 с.
9. Jaehn F., Otto A., Seifried K. Shunting operations at flat yards: retrieving freight railcars from storage tracks. *Operations Research-Spektrum*. 2018. № 40 (2). P. 367-393.
10. Valent K., Kavička A. Virtual Railway Marshalling Yard. *IFAC Proceedings Volumes*. 1997. № 30 (8). P. 843-846.

Огар Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1967-5828. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@gmail.com.

Куценко Максим Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6020-7749. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: maksimus84@meta.ua.

Верховод Микола Миколайович, магістрант, група 11-ІІ-ТТ Українського державного університету залізничного транспорту.

Старинцева Юлія Сергіївна, магістрант, група 11-ІІ-ТТ Українського державного університету залізничного транспорту.

Топчій Анна Василівна, студентка групи 13-ІІІ-ОПУТ Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 095-461-85-71. E-mail: anyatorchiy22@gmail.com.

Ohar Oleksandr, D. Sc. (Tech.), professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1967-5828. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@gmail.com.

Kutsenko Maksym, PhD (Tech.), Associate Professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6020-7749. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: maksimus84@meta.ua.

Verkhovod Mykola, master, group 11-II-TT, Ukrainian State University of Railway Transport.

Staryntseva Yuliia, master, group 11-II-TT, Ukrainian State University of Railway Transport.

Topchiy Anna Vasylyvna, student group 13-III-OPUT Ukrainian State University of Railway. Tel: 095-461-85-71. E-mail: anyatorchiy22@gmail.com.

Статтю прийнято 12.02.2020 р.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY
TRANSPORT**

Випуск 189

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

Редактори Ібрагімова Н. В., Третьякова К. А.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 13.02.2020 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 6,5. Тираж 55. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейсбаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018р.