



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 184

Харків 2019

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 № 3 від 23 квітня 2019 р.

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

Редакційна колегія

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

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (БДУТ, Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
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., доцент (УкрДУЗТ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХПІ)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-
Universität Weimar F.A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)

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

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, д.т.н., професор (Вільнюський
Гедимінаський технічний університет, Литва)
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, д.т.н., професор
(Вільнюський Гедимінаський техн ун-т, 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, д.т.н., доцент, професор
(Вільнюський Гедимінаський техн. ун-т, 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

Залізничний транспорт (273)

- Ловська А. О.* Визначення навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі при пружно-в'язкій взаємодії фітингів з фітинговими упорами 6
- Зінченко О. Є., Флото І. Є.* Порівняльний аналіз точності моделей струму комутації, які враховують наявність короткозамкнених витків обмотки якоря 19
- Мороз В. І., Братченко О. В., Громов В. І.* Новий метод динамічного синтезу високоєфективних кулачків привода клапанів транспортних дизелів 27

Будівництво та цивільна інженерія (192, 193)

- Галагура Є. І., Ковальов М. О., Кравців Л. Б., Петренко Д. Г., Биченок І. В.* Ефективність використання самонапруженого бетону як ядра для сталебетонних колон квадратного поперечного перерізу 37
- Довженко О. О., Погрібний В. В., Кобилецький В. Г., Совенко Т. О.* До питання оцінювання технічного стану залізобетонних конструкцій, що згинаються 44
- Махінко Н. О.* Розрахунок тонкостінних циліндричних оболонок на асиметричне навантаження за моментною теорією 51
- Угненко Є. Б., Ужвієва О. М., Тимченко О. М., Камчатна С. М.* Інженерно-геодезичне забезпечення просторової прив'язки природних об'єктів 61

Теплоенергетика (144)

- Дешко В. І., Білоус І. Ю., Гетманчук Г. О.* Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну в багатоповерхових будівлях в умовах мінливості зовнішнього та внутрішнього середовища 68

Транспортні технології (275)

- Григоров О. В., Аніщенко Г. О., Стрижак В. В., Петренко Н. О., Турчин О. В., Окунь А. О.* Глобальні мегатренди людства, четверта промислова революція та напрямки розвитку майбутньої економіки. Великі дані 79
- Арсененко Д. В.* Удосконалення організації перевезення зернових вантажів залізничними ступінчастими маршрутами 92
- Вітольберг В. Г., Потапов Д. О., Малішевська А. С., Муригіна Н. О.* Аналіз експлуатаційної стійкості рейок на лініях харківського метрополітену 102
- Асадов Б. С.* Визначення технологічних параметрів рейкозмащувачів аерозольного типу 108

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.463.62

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРА, РОЗМІЩЕНОГО НА ВАГОНІ-ПЛАТФОРМІ ПРИ ПРУЖНО-В'ЯЗКІЙ ВЗАЄМОДІЇ ФІТИНГІВ З ФІТИНГОВИМИ УПОРАМИ

Канд. техн. наук А. О. Ловська

DETERMINATION OF LOADING FOR A CONTAINER LOCATED ON A FLAT WAGON UNDER VISCO-ELASTIC INTERACTION BETWEEN FITTINGS AND FITTING STOPS

PhD (Tech.) A. O. Lovska

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.171446>

У статті наведені результати визначення навантаженості несучої конструкції контейнера, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні. Для забезпечення міцності контейнера при експлуатаційних режимах навантаження запропоновано постановку у фітинги пружно-в'язкого зв'язку. Доцільність запропонованих рішень підтверджено математичним моделюванням динамічної навантаженості контейнера з подальшим визначенням показників міцності його конструкції. Проведені дослідження сприятимуть створенню контейнерів нового покоління з покращеними техніко-економічними та екологічними показниками.

Ключові слова: контейнер, динамічна навантаженість, міцність, маневрове співударяння, контейнерні перевезення.

The article deals with determination of the dynamic loading of a universal dry cargo container located on a flat wagon under shunting impacts. In order to decrease the impact loads between the fittings of a container and the fitting stops of a flat wagon under shunting impacts when the impact loads exceed the friction force between the horizontal planes of the fittings and fitting stops, the author proposed to install elastic or viscous elements in the fittings of the container.

The mathematical modelling was conducted for determination of the dynamic loads on a container considering the improvements. A ICC type container located on a 13-4012 flat wagon was chosen as a prototype container. The mathematical model considered displacements of the container located on the flat-wagon at shunting impacts, i.e. displacements of the fittings of the container relative to the fitting stops of the flat-wagon. The modelling was conducted for visco-elastic interaction in the fittings of the container. The solution to the differential equations of motion was made in Mathcad by reducing them to the Cauchy form with subsequent integration by the Runge–Kutta method. The optimal parameters of visco-elastic interaction together with their conformity with the dynamic loads to the container were determined. The strength calculation for the container with consideration of measures regarding improvement and determination of dynamic loads were made. The finite-element method in CosmosWorks was used as a calculation method. It was established that the container capacity at shunting impacts was ensured.

The research conducted encourages the development of new generation containers of enhanced performance and better ecological characteristics, and also promotes a higher efficiency of combined transportation.

Keywords: container, dynamic loading, capacity, shunting impacts, container transportation.

Вступ. Розвиток зовнішньоекономічної діяльності України з Євразійськими країнами багато в чому залежить від злагодженого функціонування транспортної галузі, однією з найбільш важливих складових якої є залізничний транспорт. Необхідність підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту у міжнародному сполученні викликала створення та введення в експлуатацію контейнерних перевезень.

За даними останніх років простежується постійне підвищення об'ємів перевезень контейнерів в Україні. Так, у 2018 р. АТ «Укрзалізниця» здійснила перевезення 334,963 тис. контейнерів у двадцятифутовому еквіваленті (TEU), що на 13 % більше, ніж у 2017 р. (295,479 тис. TEU) [1].

Водночас підвищується і рівень пошкоджень контейнерів, а також вагонів-платформ, на яких здійснюється їх перевезення. Згідно із зібраним статистичним матеріалом пошкоджень контейнерів у Одеському відділенні філії Центру транспортного сервісу «Ліски» АТ «Укрзалізниця» у 2018 р. близько 12 % від загальної кількості контейнерів мали пошкодження фітінгів, що вище ніж у 2017 р. на 3 %. Стосовно вагонів-платформ – у 2018 р. зафіксовано близько 16 % пошкоджень їх фітінгових упорів, що на 4 % вище ніж у 2017 р.

Тому при створенні контейнерів нового покоління з покращеними техніко-економічними та екологічними показниками необхідним є урахування уточнених величин навантажень, які діють на них, а також прийняття нових інноваційних рішень, спрямованих на зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій як контейнерів, так і вагонів-платформ в експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливості використання спрощених методів виміру напружено-деформованого стану кузова-контейнера змінного об'єму наведені у [2]. У роботі запропонована схема навантаження та методика випробувань кузовів-контейнерів на поперечний на повздовжній перекосях.

Визначення напружено-деформованого стану кузова-контейнера змінного об'єму проводиться у [3]. Розрахунок здійснений у середовищі програмного забезпечення Ansys. Для перевірки адекватності отриманих результатів проводилися експериментальні дослідження на поперечний перекис контейнера при незначних величинах навантажень.

Заходи щодо удосконалення несучої конструкції контейнера для зменшення його динамічної навантаженості при експлуатаційних режимах у зазначених роботах не наводяться.

Дослідження напружено-деформованого стану кузова-контейнера при підйманні краном та переміщенні волоком проводиться у [4]. Теоретичне визначення показників міцності здійснено у пакеті програмного забезпечення APM WinMachine. Експериментальне дослідження міцності проводилося за допомогою методу електричного тензометрування.

Особливості створення контейнера для перевезення плодоовочевої продукції висвітлені у [5]. У статті наведені вимоги до кузова-контейнера, запропонована його конструкція та проведений розрахунок на міцність за методом скінченних елементів.

Важливо зазначити, що дослідження динамічної навантаженості контейнерів у цих роботах не проводиться, а визначення показників міцності здійснюється з урахуванням нормативних величин навантажень.

Дослідження динамічної навантаженості контейнерів, розміщених на вагоні-платформі, при маневровому співударянні шляхом математичного та комп'ютерного моделювання проводиться у [6]. У статті наведені результати визначення прискорень як складових динамічних навантажень для випадку відсутності зазорів між фітинговими упорами вагона-платформи та контейнерів, а також при їх наявності.

Завдання удосконалення несучої конструкції контейнера для забезпечення його міцності при експлуатаційних режимах навантаження в розглянутій роботі не ставиться.

Дослідження динамічних навантажень, що діють на контейнер-цистерну, розміщену на вагоні-платформі, при маневровому співударянні наведені в [7]. Взаємодія контейнера-цистерни з вагоном-платформою імітувалася пружно-дисипативним зв'язком при повздовжньому навантаженні від вагона-бойка 2200–2800 кН. Вибір параметрів амортизуючого пристрою проводився для випадку коли зазори між фітингами та фітинговими упорами максимальні, а рух наливного вантажу відсутній. Наведена модель ураховує наявність трьох ступенів вільності контейнера.

Максимальна величина повздовжньої сили удару, яка може діяти на вагон-платформу з розміщеним на ньому вантажем, у тому числі контейнерами, при маневровому співударянні становить 3,5 МН [8, 9].

Тому з метою отримання уточненого значення прискорень, які діють на контейнер в експлуатації, необхідним є проведення додаткових досліджень.

Визначення динамічної навантаженості контейнера при експлуатаційних режимах навантаження проведено у [10]. Отримані величини динамічних навантажень ураховано при розрахунках на міцність контейнера в середовищі програмного забезпечення Ansys.

Особливості розрахунку на міцність підлоги 40-футового контейнера у програмному комплексі Abaqus/CAE v 6.1 наведені в [11]. Запропоновані рекомендації щодо безпечної експлуатації цього типу контейнера.

Заходи щодо удосконалення несучих конструкцій контейнерів з метою зменшення їх динамічної навантаженості при маневровому співударянні в розглянутих роботах не запропоновані.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є визначення навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі, при пружно-в'язкій взаємодії фітингів з фітинговими упорами. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

1. Удосконалення несучої конструкції контейнера з метою зменшення динамічної навантаженості при найбільш несприятливих експлуатаційних режимах.

2. Визначення динамічної навантаженості контейнера з урахуванням заходів щодо удосконалення шляхом математичного моделювання.

3. Визначення показників міцності несучої конструкції контейнера з урахуванням заходів щодо удосконалення.

4. Визначення динамічної навантаженості контейнера з урахуванням заходів щодо удосконалення шляхом комп'ютерного моделювання.

5. Верифікація розроблених моделей.

6. Визначення критичних частот коливань контейнера удосконаленої конструкції, розміщеного на вагоні-платформі, при маневровому співударянні.

Основна частина дослідження. Для зменшення ударних навантажень між фітингами контейнера та фітинговими упорами вагона-платформи при маневровому співударянні, якщо динамічне навантаження P_0 перевищує силу тертя між горизонтальними площинами фітингів та фітингових упорів, пропонується постановка у фітинги контейнера пружних елементів (рис. 1).

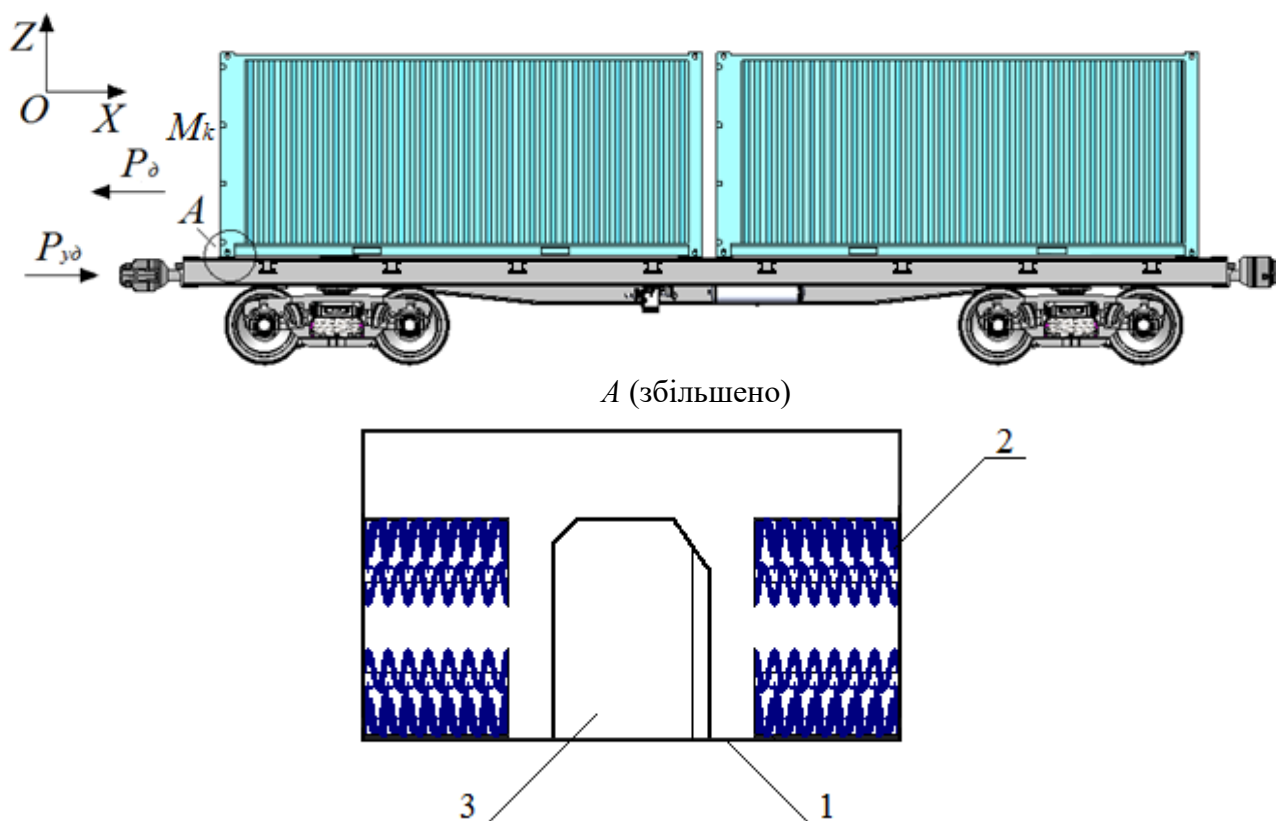


Рис. 1. Схема дії повздовжньої сили на вагон-платформу з контейнерами, розміщеними на ньому: 1 – фітинг; 2 – пружний елемент; 3 – фітинговий упор

Для визначення динамічної навантаженості контейнера при маневровому співударянні з урахуванням заходів щодо удосконалення складено математичну модель (1), яка враховує переміщення контейнера, розміщеного на вагоні-платформі.

Як вагон-прототип обрано вагон-платформу моделі 13-4012М. Дослідження проведені стосовно контейнера типорозміру 1СС.

Схема дії сил між фітингом контейнера та фітинговим упором вагона-платформи при маневровому співударянні з урахуванням заходів щодо удосконалення наведена на рис. 2.

У моделі враховано силу сухого тертя, яка виникає при переміщенні фітингів контейнерів відносно горизонтальних площин фітингових упорів та пружний зв'язок між фітинговими упорами та фітингами [7]. Дослідження

динамічної навантаженості контейнера проводилося у плоскій системі координат.

При складанні моделі прийнято припущення, що контейнер завантажений умовним вантажем з використанням максимально допустимої вантажопідйомності. Тобто в розрахунках ураховано повну вагу бруто контейнера.

Оскільки ударне навантаження, яке дорівнює 3,5 МН, відповідно до [8, 9] прикладається до опорної поверхні заднього упора автозчепу з одного боку вагона та врівноважується повздовжніми силами інерції мас кузова вагона, візків, автозчепів та вантажу, то в моделі не враховано наявність поглинального апарату.

Розв'язання математичної моделі (1) здійснено в середовищі програмного забезпечення MathCad [12, 13]. При цьому вона зводилася до нормальної форми Коші $\dot{y}(t) = Q(t, y)$ [13], де $q_1 = y_1$; $q_2 = y_2$; $\dot{q}_1 = y_3$; $\dot{q}_2 = y_4$.

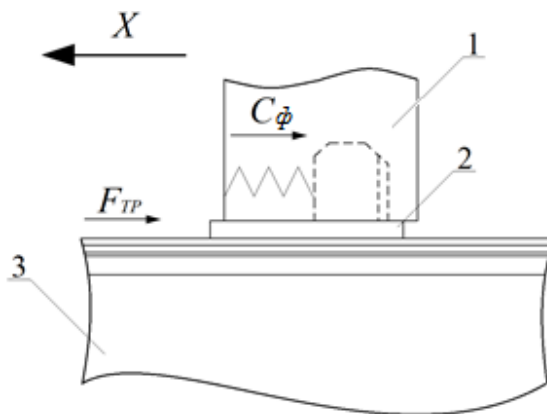


Рис. 2. Схема дії сил між фітингом контейнера та фітинговим упором вагона-платформи при маневровому співударянні з урахуванням заходів щодо удосконалення:
1 – фітинг; 2 – фітинговий упор; 3 – повздовжня балка вагона-платформа

$$\begin{cases} M_{ВПФ}^{повн} \cdot \ddot{q}_1 = P_{y0} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C_\phi (q_1 - q_2)), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C_\phi \cdot (q_1 - q_2)), \end{cases} \quad (1)$$

де $M_{ВПФ}^{повн}$ – маса-брутто вагона-платформи;
 P_{y0} – величина повздовжньої сили, що діє на автосцеп; n – кількість контейнерів, розміщених на вагоні-платформі; F_{TP} – сила тертя між фітинговими упорами та фітингами; M_k – маса контейнера; C_ϕ – жорсткість пружних елементів у фітингах контейнера; q_1, q_2 – координати, що визначають переміщення, відповідно вагона-платформи та контейнера відносно повздовжньої осі.

Розв’язання системи диференціальних рівнянь (1) у нормальній формі проводилося інтегруванням за методом Рунге-Кутта.

Початкові умови прийняті рівними нулю, при цьому $(y_1 - y_2) < 0,03$ [12].

На підставі проведених розрахунків отримано прискорення, які діють на удосконалену конструкцію контейнера, розміщеного на вагоні-платформі, при маневровому співударянні (рис. 3). Ця величина прискорення становить близько 50 м/с^2 ($\approx 5g$), тобто перевищує нормативну величину прискорення на 60 % [15].

$$Q(t, y) = \left| \begin{array}{c} y_3 \\ y_4 \\ \frac{P_{y0} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(y_3 - y_4) + C_\phi (y_1 - y_2))}{M_{ВПФ}^{повн}} \\ \frac{F_{TP} \cdot \text{sign}(y_3 - y_4) + C_\phi \cdot (y_1 - y_2)}{M_k} \end{array} \right| \quad (2)$$

$$Z = rkfixed(Y0, tn, tk, n', Q),$$

де $Y0$ – вектор, який містить початкові умови; tn, tk – величини, які визначають початкову та кінцеву змінну інтегрування; n' – фіксована кількість кроків; Q – символічний вектор.

Отже, пружний зв'язок між фітингами та фітинговими упорами при цій розрахунковій схемі не компенсує повною мірою величину динамічного навантаження, яке діє на контейнер.

Тому розглянуто випадок в'язкої взаємодії фітингів контейнера з фітинговими упорами вагона-платформи (рис. 4).

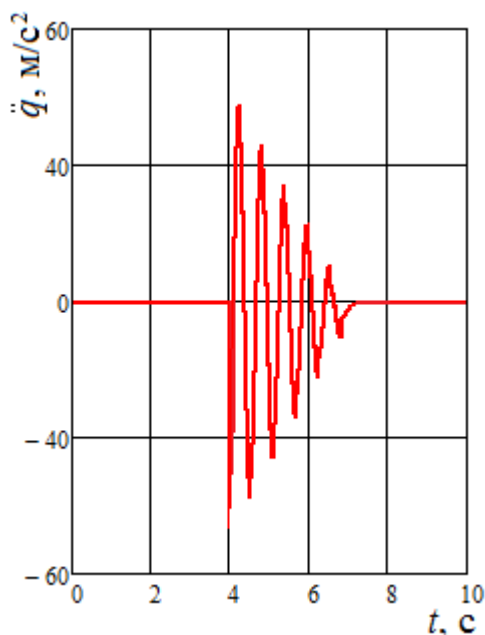


Рис. 3. Прискорення, які діють на контейнер з пружними зв'язками у фітингах, розміщений на вагоні-платформі, при маневровому співударянні

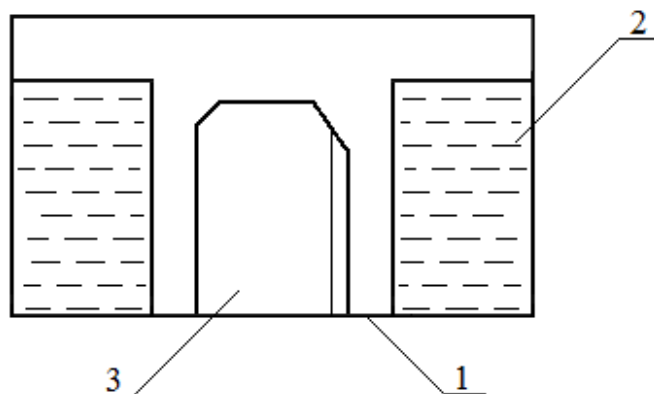


Рис. 4. Взаємодія фітингового упору з фітингом:
1 – фітинг; 2 – в'язкий елемент; 3 – фітинговий упор

Математична модель динамічної навантаженості контейнера при маневровому

співударянні з урахуванням наявності у фітингах в'язкого зв'язку наведена нижче.

$$\begin{cases} M_{ВПФ}^{повн} \cdot \ddot{q}_1 = P_{y0} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + \beta_\phi (\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + \beta_\phi (\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \end{cases} \quad (3)$$

де β_ϕ – коефіцієнт в'язкого опору у фітингах контейнера.

Прискорення, які діють на контейнер з в'язкими зв'язками у фітингах, розміщений на вагоні-платформі, при маневровому співударянні, наведені на рис. 5.

При заданій величині в'язкого опору у фітингах контейнера прискорення становило близько 20 м/с^2 ($\approx 2g$) та не перевищувало нормативну величину [15].

При цьому в'язкий опір переміщенню контейнера повинен перебувати в діапазоні $10\text{--}50 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$.

Для зменшення динамічної навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі, при маневровому співударянні також розглянутий варіант виконання фітингів з пружно-в'язкими зв'язками. Математична модель для визначення динамічної навантаженості контейнера наведена нижче.

$$\begin{cases} M_{ВПФ}^{повн} \cdot \ddot{q}_1 = P_{y0} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C_\phi (q_1 - q_2) + \beta_\phi (\dot{q}_1 - \dot{q}_2)), \\ M_k \cdot \ddot{q}_2 = (F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C_\phi \cdot (q_1 - q_2) + \beta_\phi (\dot{q}_1 - \dot{q}_2)). \end{cases} \quad (4)$$

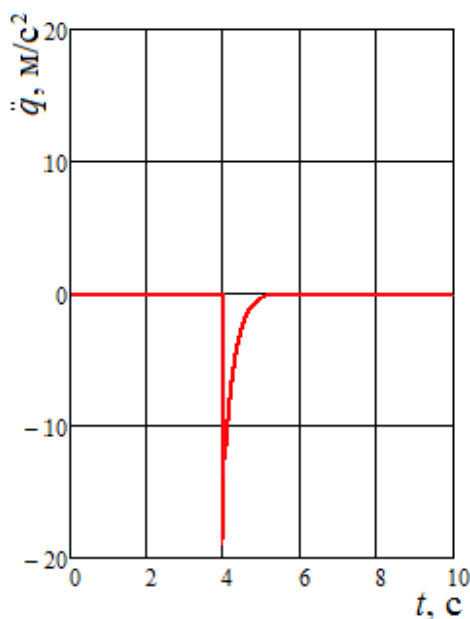


Рис. 5. Прискорення, які діють на контейнер з в'язкими зв'язками у фітингах, розміщений на вагоні-платформі, при маневровому співударянні

Результати проведених розрахунків показали, що при значенні жорсткості пружного елемента 20 кН/м та коефіцієнта в'язкого опору $30 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$ прискорення, які

діють на контейнер, розміщений на вагоні-платформі, при маневровому співударянні становлять близько 20 м/с^2 ($\approx 2g$) (рис. 6) та перебувають у межах допустимих [15].

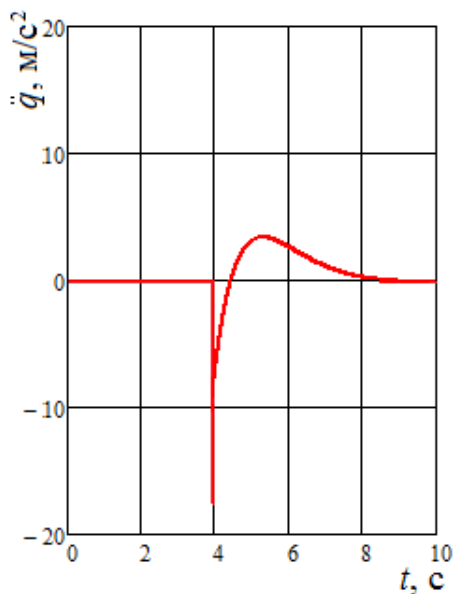


Рис. 6. Прискорення, які діють на контейнер з пружно-в'язкими зв'язками у фітингах, розміщений на вагоні-платформі, при маневровому співударянні

Для дослідження міцності контейнера з урахуванням заходів щодо удосконалення побудовано його просторову модель (рис. 7). Графічні роботи виконувалися в середовищі програмного забезпечення SolidWorks. Розрахунок проведений за методом скінчених елементів, реалізованого в програмному пакеті CosmosWorks [16].

Як скінчені елементи застосовані просторові ізопараметричні тетраедри, оптимальна кількість елементів яких визначена за графоаналітичним методом. Кількість вузлів сітки становила 39789, елементів – 123139 (рис. 8, а). Максимальний розмір елемента дорівнює 120 мм, мінімальний – 24 мм. Мінімальна кількість елементів у колі становила 9, співвідношення збільшення розмірів елементів у сітці – 1,7. Максимальне співвідношення боків – 8583,8, відсоток елементів зі співвідношенням боків менше 3 – 19,1, більше 10 – 47,3.

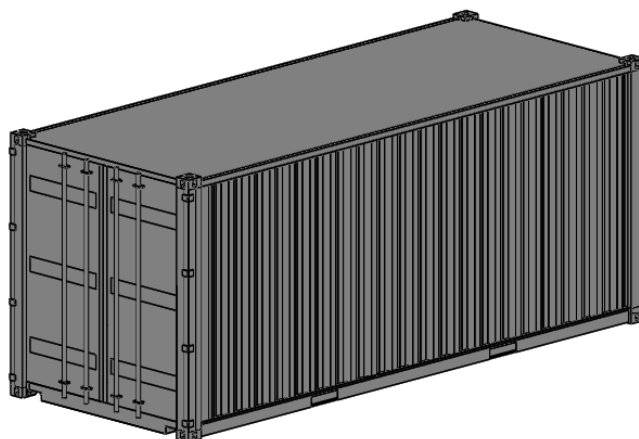


Рис. 7. Просторова модель контейнера типорозміру 1СС

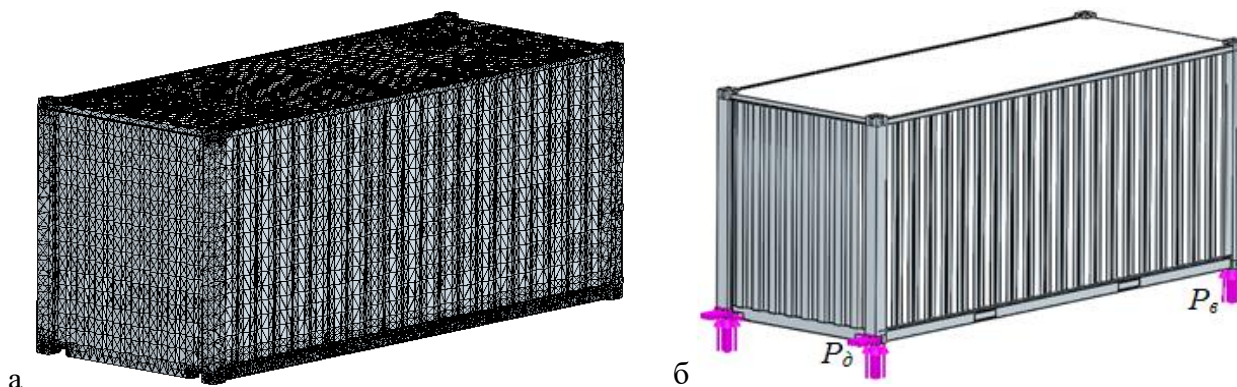


Рис. 8. Моделювання міцності контейнера: а – скінчено-елементна модель; б – розрахункова схема

При складанні моделі міцності контейнера враховано, що на фітинги діє динамічне навантаження P_o , а також вертикальні реакції у зонах обпирання фітингів на фітингові упори P_e (рис. 8, б).

При складанні моделі не враховано дію вантажу, розміщеного у контейнері, на його стіни. Закріплення контейнера

здійснювалося у зонах обпирання на вагон-платформу. Ураховано, що при дії на фітинги динамічного навантаження здійснюється його переміщення відносно початкового положення.

Як матеріал конструкції використано сталь марки 09Г2С. Результати розрахунку на міцність несучої конструкції контейнера наведені на рис. 9, 10.

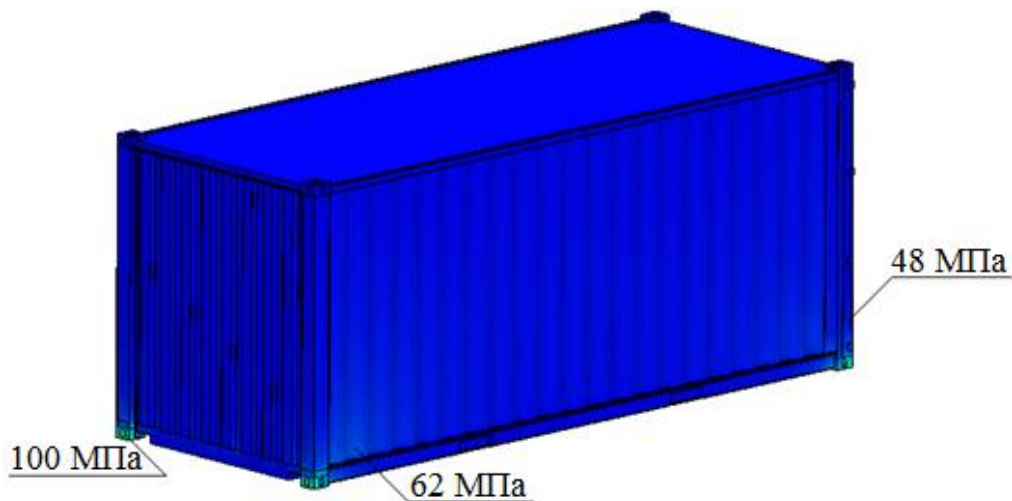


Рис. 9. Напружений стан контейнера, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні

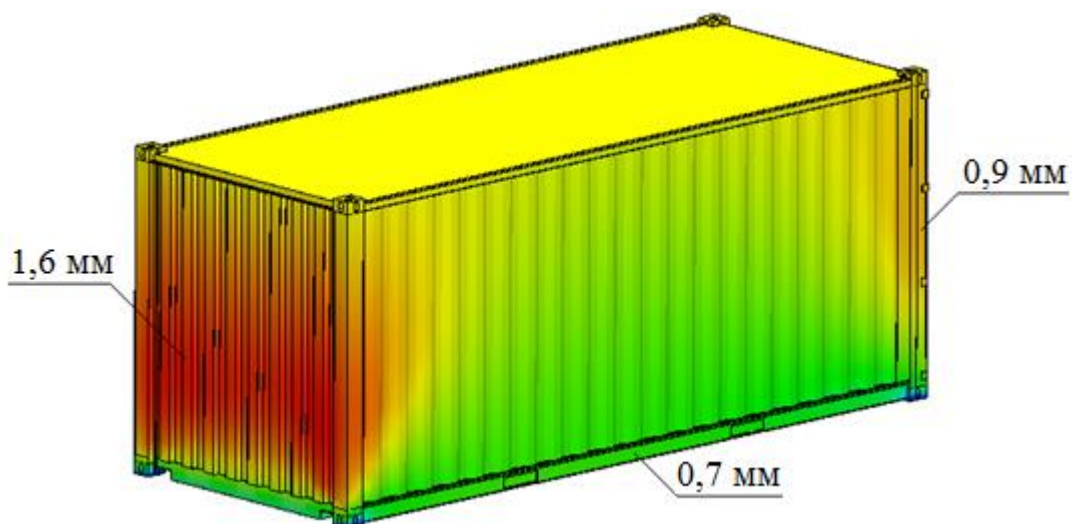


Рис. 10. Переміщення у вузлах контейнера, розміщеного на вагоні-платформі, при маневровому співударянні

Максимальні еквівалентні напруження виникають у фітингах контейнера та становлять близько 100 МПа, максимальні переміщення дорівнюють 1,6 мм та зосереджені в середній частині торцевої стіни контейнера, максимальні деформації – $1,24 \cdot 10^{-3}$. Отже, максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції контейнера не перевищують допустимі [8, 9].

Також проведений розрахунок на міцність контейнера при наявності у фітингах пружно-в'язкого зв'язку, при цьому максимальні еквівалентні напруження становили 92 МПа, переміщення у

вузлах – 1,3 мм, деформації – $1,18 \cdot 10^{-3}$. Тобто умова міцності виконується.

Максимальні еквівалентні напруження, які діють на контейнер, з урахуванням заходів щодо удосконалення майже у 8 разів нижчі за напруження, що виникають у типовій конструкції контейнера при переміщенні фітингів відносно фітингових упорів (рис. 11). Отже, введення в'язкого або пружно-в'язкого зв'язку між фітинговими упорами та фітингами дає змогу значно знизити їх навантаженість та забезпечити міцність при експлуатаційних режимах.

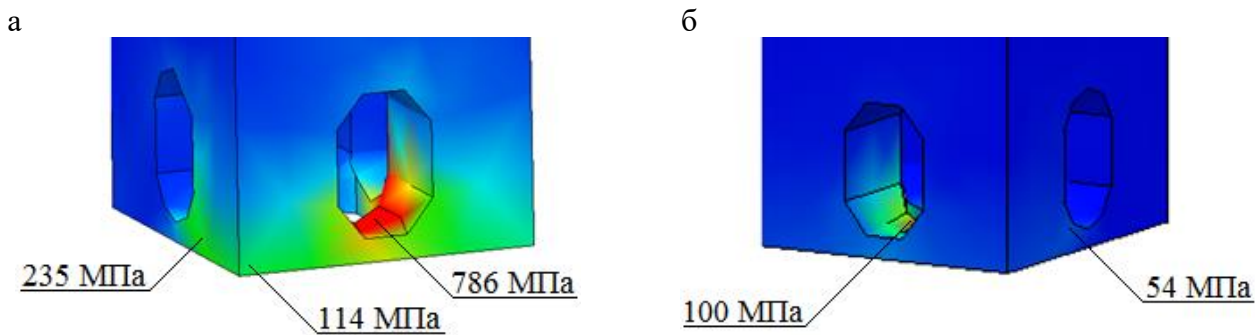


Рис. 11. Напружений стан фітингів контейнера:
а – типова конструкція; б – удосконалена конструкція

Результати напруженого стану фітингів отримані для випадку наявності переміщень контейнера відносно рами вагона-платформи. Максимальні еквівалентні напруження у фітингах перевищують ті, що бувають при нерухомості контейнера, більше ніж у 2 рази [6]. Отже, для забезпечення міцності контейнерів на стадії їх проектування до уваги слід брати не тільки умови експлуатації, зазначені у [2–5, 10, 11], а й маневрове співударення з урахуванням переміщень фітингів відносно фітингових упорів.

При цьому зменшення динамічної навантаженості контейнера пропонується досягти шляхом удосконалення фітингів, а не його несучої конструкції на відміну від проаналізованих вище заходів.

Розподілення максимальних еквівалентних напружень за довжиною нижнього поперечного бруса рами контейнера при наявності у фітингах в'язкого зв'язку наведено на рис. 12. Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають у кінцевих частинах бруса.

Розподілення максимальних еквівалентних напружень за довжиною нижнього поперечного бруса рами контейнера при наявності пружно-в'язкого зв'язку у фітингах має вигляд, подібний до залежності, наведеної на рис. 12, але з відповідними числовими значеннями максимальних еквівалентних напружень.

При цьому максимальні еквівалентні напруження у поперечному брусі контейнера нижчі на 15 %, ніж при типовій схемі взаємодії фітингів з фітинговими упорами.

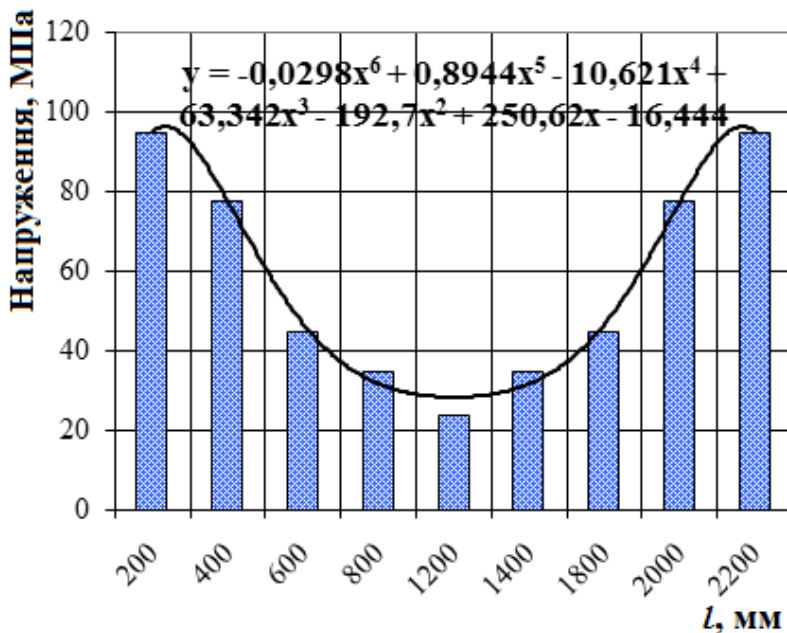


Рис. 12. Розподілення максимальних еквівалентних напружень за довжиною нижнього поперечного бруса рами контейнера

За розробленою моделлю міцності здійснено визначення динамічної навантаженості контейнера шляхом комп'ютерного моделювання. Установлено, що максимальні прискорення, які діють на контейнер з урахуванням в'язкої взаємодії фітингів з фітинговими упорами, виникають у торцевих стінах з консольних частин рами вагона-платформи та становлять близько 20 м/с². При пружно-в'язкій взаємодії фітингів з фітинговими упорами прискорення становили 19,7 м/с².

З метою верифікації розроблених моделей застосований F-критерій [17]. Вхідним параметром математичної та комп'ютерної моделей динамічної навантаженості контейнера є сила удару в автозчеп вагона-платформи, а вихідним – прискорення, які діють на контейнер, розміщений на вагоні-платформі.

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (5)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності;
 S_y^2 – дисперсія відтворюваності.

Необхідне число статичних даних визначалося за формулою [18].

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\delta^2}, \quad (6)$$

де t – табличне значення критерію Стьюдента; σ – середньоквадратичне відхилення випадкової величини; δ^2 – абсолютна похибка результату вимірювань.

Результати розрахунку показали, що для випадку в'язкої взаємодії фітингів з фітинговими упорами при дисперсії відтворюваності $S_y = 2,83$ та дисперсії адекватності $S_{ad}^2 = 3,1$ фактичне значення F-критерію $F_p = 1,09$, що менше від табличного значення критерію $F_t = 3,07$. Отже, гіпотеза про адекватність розробленої моделі не заперечується.

При пружно-в'язкій взаємодії фітингів з фітинговими упорами дисперсія відтворюваності становила $S_y = 2,7$ та дисперсія адекватності $S_{ad}^2 = 3,0$. Фактичне значення F-критерію $F_p = 1,11$, що менше від табличного значення $F_t = 3,07$. Тобто гіпотеза про адекватність не заперечується.

Для визначення критичних частот коливань контейнера удосконаленої конструкції, розміщеного на вагоні-платформі, при маневровому співударянні проведений модальний аналіз у середовищі програмного забезпечення CosmosWorks.

Числові значення критичних частот коливань наведені у таблиці.

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що значення критичних частот коливань перебувають у межах допустимих [8, 9].

Таблиця

Числові значення критичних частот коливань контейнера удосконаленої конструкції

Форма коливань	Зв'язок у фітингах			
	В'язкий		Пружно-в'язкий	
	Частота, рад/с	Частота, Гц	Частота, рад/с	Частота, Гц
1	72,97	11,61	74,26	11,82
2	104,41	16,62	105,84	16,85
3	114,25	18,18	115,16	18,33
4	133,75	21,29	135,69	21,6
5	134,74	21,44	137,65	21,91
6	135,11	21,5	137,85	21,94
7	135,22	21,52	139,07	21,13
8	138,3	22,0	139,87	22,26

Висновки. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Для зменшення ударних навантажень між фітингами контейнера та фітинговими упорами вагона-платформи при маневровому співударянні запропоновано удосконалення фітингів контейнерів шляхом введення у них в'язких та пружно-в'язких зв'язків.

2. Визначено динамічну навантаженість контейнера з урахуванням заходів щодо удосконалення. Для забезпечення міцності несучої конструкції контейнера значення коефіцієнта в'язкого опору у фітингах повинно перебувати в діапазоні 10–50 кН·с/м. При наявності пружно-в'язкого зв'язку у фітингах жорсткість пружного елемента повинна становити 20 кН/м та коефіцієнта в'язкого опору – 30 кН·с/м.

3. Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції контейнера з урахуванням заходів щодо удосконалення. Установлено, що при в'язкому зв'язку максимальні еквівалентні напруження

виникають у фітингах контейнера та становлять близько 100 МПа, максимальні переміщення дорівнюють 1,6 мм, максимальні деформації – $1,24 \cdot 10^{-3}$. При пружно-в'язкому зв'язку максимальні еквівалентні напруження у контейнері становили 92 МПа, переміщення у вузлах – 1,3 мм, деформації – $1,18 \cdot 10^{-3}$. Тобто умова міцності виконується.

4. Проведено комп'ютерне моделювання динамічної навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі, при маневровому співударянні. При цьому максимальні прискорення, які діють на контейнер, з урахуванням в'язкої взаємодії фітингів з фітинговими упорами становлять близько 20 м/с^2 , при пружно-в'язкій взаємодії – $19,7 \text{ м/с}^2$.

5. Проведено верифікацію розроблених моделей динамічної навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні за F-критерієм. Установлено, що гіпотеза про адекватність не відхиляється.

6. Визначено числові значення критичних частот коливань контейнера удосконаленої конструкції. При цьому значення частот коливань перебувають у межах допустимих;

7. Проведені дослідження сприятимуть зменшенню навантаженості контейнерів при найбільш несприятливих режимах експлуатації та підвищенню ефективності функціонування комбінованих перевезень.

Список використаних джерел

1. "Укрзалізниця" в 2018 году нарастила объем перевозок контейнеров на 13%. URL: https://cfts.org.ua/news/2019/01/30/ukrzaliznytsya_v_2018_godu_narastila_obyem_perevozo_k_konteynerov_na_13_51438 (дата звернення: 30.01.19).
2. Мишута Д. В. Упрощенные методы измерения напряженно-деформированного состояния кузова-контейнера переменного объема. *Приборы и методы измерений*. 2012. № 2(5). С. 100–103.
3. Мишута Д. В., Альгин В. Б., Михайлов В. Г. Оценка напряженно-деформированного состояния кузова-контейнера переменного объема. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2012. № 4(37). С. 61–68.
4. Еремин В., Семенникова Л. Исследование напряженно-деформированного состояния кузов-контейнера с помощью программного комплекса АРМ WinMachine. *САПР и графика*. 2004. № 7. С. 23–28.
5. Ибрагимов Н. Н., Рахимов Р. В., Хаджимухамедова М. А. Разработка конструкции контейнера для перевозки плодоовощной продукции. *Молодой ученый*. 2015. № 21(101). С. 168–173.
6. Lovskaya A., Rybin A. The study of dynamic load on a wagon-platform at a shunting collision. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 3. P. 4–8.
7. Богомаз Г. И., Мехов Д. Д., Пилипченко О. П., Черномашенцева Ю. Г. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. *Динамика та керування рухом механічних систем*. Зб. наук. праць. Київ: АНУ, Інститут технічної механіки, 1992. С. 87–95.
8. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Чинний від 2015-07-01.
9. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Действителен от 2014-12-22. URL: <http://internet-law.ru/gosts/gost/60124/> (дата звернення: 24.04.2019).
10. Stephen Tiernan, Martin Fahy. Dynamic fea modelling of iso tank container. *Journal of materials processing technology*. 2002. №124 (1). P. 126–132.
11. Arkadiusz Rzeczycki, Bogusz Wisnicki. Strength analysis of shipping container floor with gooseneck tunnel under heavy cargo load. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 252. P. 81–90.
12. Дьяконов В. MATHCAD 8/2000: спец. справочник. Санкт-Петербург: Питер, 2000. 592 с.
13. Кирьянов Д. В. Mathcad 13. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. 608 с.
14. Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю. Основи динаміки вагонів: навч. посібник. Київ: КУЕТТ, 2003. 269 с.
15. ДСТУ ISO 1496-1:2013. Вантажні контейнери серії 1. Технічні вимоги та методи випробовування. Ч. 1. Контейнери загальної призначеності універсальні. Чинний від 2017-07-01.

16. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006–2007. Инженерный анализ методом конечных элементов. Москва: ДМК, 2007. 784 с.

17. Чернова Н. И. Математическая статистика. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2007. 148 с.

18. Космин В. В. Основы научных исследований: учеб. пособие. Москва: ГОУ «Учебно-метод. центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. 271 с.

Ловська Альона Олександрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-35. E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com.

Lovska Alyona Oleksandrivna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Wagons, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-35. E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com.

Статтю прийнято 18.04.2019 р.

УДК 629.423.31:519.62

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ МОДЕЛЕЙ СТРУМУ КОМУТАЦІЇ, ЯКІ ВРАХОВУЮТЬ НАЯВНІСТЬ КОРОТКОЗАМКНЕНИХ ВИТКІВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Канд. техн. наук О. Є. Зінченко, інж. І. Є. Флото

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ACCURACY OF COMMUTATION CURRENT MODELS, WHICH TAKE INTO ACCOUNT THE PRESENCE OF SHORT-CIRCUITED TURNS OF THE ARMATURE WINDING

PhD (Tech.) O. Zinchenko, Engineer I. Floto

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.171458>

Розглянуто існуючі математичні моделі часової залежності струму комутації колекторного електродвигуна. Моделі класифіковано за підходами, використаними при описанні комутованого кола секції обмотки якоря. Визначено явні та неявні математичні й фізичні припущення, прийняті при побудові цих моделей. Дано оцінку ступеню прийнятності кожної з моделей з погляду точності відтворення реальної часової залежності струму комутації.

Ключові слова: електродвигун, струм комутації, математична модель, обмотка якоря, коротке замикання, диференціальне рівняння.

A modern strategy for locomotive maintenance is based on the operational diagnostics of their equipment. Currently, a large number of locomotives are equipped with DC electric motors. These locomotives will be operated in the short term. About half of the failures of DC electric motors are caused by the failure of the armature structure elements and, above all, the armature winding. Detection of the nature of damage to this winding and the extent of its damage reduces the time spent on repairing the motor. The large fleet of locomotives with DC commutator motors determines the relevance of the problem of diagnosing the armature winding. The greatest amount of information about the state of the winding contains the dependence of the commutation current of its sections on time. Existing publications have paid great attention to the development of

competing or complementary models of such dependencies. However, solving the problem of quantitative comparison of the developed models still requires significant efforts. The object of the paper study is the error of modeling of commutation current, provided that some of the armature winding turns are short-circuited. The aim of the study is a comparative analysis of the existing models of this current. In order to achieve this goal, the tasks were solved, as follows: 1) to clearly distinguish between models, according to methods for determining the dependence of current on time; 2) to determine the degree of physical and mathematical correctness of each of these models; 3) to assess the conditions of existence and numerical values of the differences between these models. Comparison of models in terms of accuracy has shown that the best is the selection of a separate current model for each specific combination of two special parameters. These parameters describe the degree of shorting of the armature winding section. However, it is inconvenient that with different combinations of parameters, one has to operate with different mathematical expressions. The generalized model of commutation current gives the same expressions for all combinations of the specified parameters. However, this model should be enhanced to improve its accuracy in the field of large numerical values of parameters.

Keywords: *electric motor, commutation current, mathematical model, short circuit, differential equation.*

Вступ. Оперативна діагностика обладнання є основою сучасної стратегії технічного обслуговування локомотивів. У тягових електроприводах великої кількості локомотивів, що експлуатуються на цей час та будуть експлуатуватися в найближчій перспективі, використовуються електродвигуни постійного струму. Тому їх діагностування є важливою складовою комплексу заходів, що забезпечують ефективну експлуатацію локомотивів. Близько половини відмов двигунів постійного струму спричинені виходом з ладу елементів конструкції якоря, насамперед його обмотки. Отже, своєчасне виявлення характеру та ступеня пошкоджень цієї обмотки дає змогу зменшити витрати часу на ремонт двигуна та локомотива в цілому, що в умовах наявності великого парку локомотивів з колекторними двигунами постійного струму обумовлює актуальність розв'язання задачі діагностики обмотки якоря.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільшу кількість інформації про стан обмотки якоря несе часова залежність струму комутації кожної секції цієї обмотки [1, 2]. Побудовано математичні моделі цієї залежності як без урахування можливих несправностей

обмотки [3], так і з урахуванням можливих коротких замикань [4, 5]. У роботі [6] викладено експериментальні результати дослідження впливу швидкості обертання якоря на величину залишкового струму комутації. Розгляду питання впливу часової зміни провідності перехідного контакту між щіткою та пластиною колектора на часову залежність струму комутації присвячено статтю [7]. Новітній підхід до діагностичної інтерпретації явищ, які спостерігаються у колекторно-щітковому вузлі, поданий у роботі [8]. Власне явну побудову аналітичної моделі часової залежності струму комутації виконано в роботах [3–5, 7]. У роботах [6, 8] розглянуто опосередковану інтерпретацію явищ в обмотці, яка не пов'язана явним математичним чином з параметрами електричного кола обмотки. При побудові ж явних моделей у роботах [4, 5] використано певні апроксимації проміжних виразів, у зв'язку з чим постає питання точності, з якою побудовані моделі відтворюють реальні струмові процеси.

Таким чином, розвитку конкуруючих або доповнюючих моделей часової залежності струму комутації обмотки якоря електродвигуна постійного струму на цей час приділено велику увагу. Однак

розв'язання проблеми кількісного порівняння розроблених моделей ще потребує суттєвих зусиль.

Визначення мети та завдання дослідження. Як об'єкт дослідження цієї роботи виступає похибка моделювання струму комутації колекторного електро-двигуна за наявності короткозамкнених витків обмотки якоря.

Метою дослідження є порівняльний аналіз запропонованих на цей час аналітичних моделей такого струму.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- 1) чітко розділити моделі за методами визначення часової залежності шуканого струму;
- 2) визначити ступінь фізичної та математичної коректності кожної з цих моделей;
- 3) дати оцінку умов існування та величин розбіжностей між моделями.

Основна частина дослідження. Найбільш простою та зручною для аналізу є петльова рівносекційна обмотка, у якій усі провідники однієї сторони кожної із секцій лежать в одному пазу. Для формального описання струму секції в цьому випадку в роботах [3–5, 7] використані диференціальні рівняння. У підсумку часові залежності струму комутації в роботах [3–5] отримують своє

визначення шляхом аналітичного розв'язання цих рівнянь, а в роботі [7] – шляхом їх розв'язування методом кінцевих елементів. Однак лише в роботах [4, 5] вихідні диференціальні рівняння враховують наявність певної несправності обмотки якоря, а саме – наявність замкнених накоротко витків секції, комутація якої відбувається. Тому в подальшому будуть розглянуті тільки моделі, побудовані саме в цих двох роботах.

Фізичною основою моделі секції, яка містить кілька прилеглих один до одного короткозамкнених витків, є її уявлення у вигляді трансформатора з індуктивністю $L_{кзв}$ та активним опором навантаження $R_{кзв}$ вторинної обмотки (саме короткозамкнених витків), а також індуктивністю $L_{окс}$ та активним опором $R_{окс}$ первинної обмотки (витків, що залишилися незамкненими). Взаємну індуктивність цих двох частин обмотки позначимо як M . Як I_a позначимо постійний струм якоря, а як i – власне струм комутуваної секції (струм комутації). Відповідну до введених позначень частину розгортки двигуна показано на рис. 1. Ураховуючи, що величина $R_{окс}$ є набагато меншою, ніж сумарний перехідний опір між щіткою та пластинами 1 і 2 колектора, в роботі [4] отримане таке диференціальне рівняння для струму комутації:

$$\frac{di}{dt} + i \frac{1}{t(T-t) + \beta T^2} \left[\alpha T - \beta T^2 \frac{T-2T}{t(T-t)} \right] + I_a \beta T \frac{T^2 + 2t^2 - 2tT}{t(T-t)} \cdot \frac{1}{t(T-t) + \beta T^2} + I_a \alpha \frac{2t-T}{t(T-t) + \beta T^2} + \frac{E_{кокс}}{L_{кокс}} \cdot \frac{t(T-t)}{t(T-t) + \beta T^2} = 0. \quad (1)$$

Тут як T позначено період комутації, як $E_{кокс}$ – комутуючу ЕРС незамкненої частини секції. Уведено також позначення

$$\alpha = \delta_{окс} T \text{ та } \beta = \frac{\delta_{окс}}{\delta_{кзв}}, \text{ де } \delta_{окс} = \frac{R_{щ}}{L_{окс}} \text{ (тут } R_{щ} \text{ – постійний опір щітки) та } \delta_{кзв} = \frac{R_{кзв}}{L_{кзв}}.$$

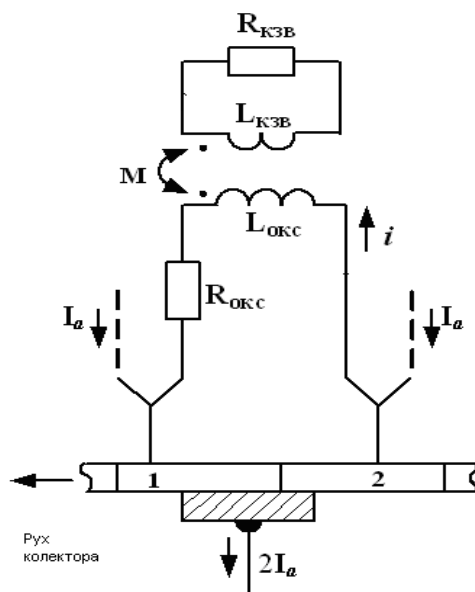


Рис. 1. Розгортка ділянки двигуна

У роботі [4] знайдені такі наближені розв’язки рівняння (1):
 - при $\alpha = 1$ та $\beta = 1$

$$i(t) = I_a \left(1 - 2\frac{t}{T}\right) + i_D(t),$$

де

$$i_D(t) = 0,948 \frac{t(T-t) \left(1,622 - \frac{t}{T}\right)}{t(T-t) + T^2} \left(\frac{1,055 E_{\text{кокс}} T}{L_{\text{окс}}} - 2,11 I_a \right) \left[\ln \left(1,622 - \frac{t}{T}\right) - 0,484 \right]; \quad (2)$$

- при $\alpha = 1$ та $\beta = 20$

$$i = I_a (1 - 2x) + \frac{x(1-x)}{[20 + x(1-x)](0,0475x + 0,9775)} \times \left[\left(0,0475 I_a - 0,0238 \frac{E_{\text{кокс}} T}{L_{\text{окс}}}\right) x^2 + \left(1,955 I_a - 0,9775 \frac{E_{\text{кокс}} T}{L_{\text{окс}}}\right) x \right], \quad (3)$$

де $x = t/T$.

Однак у ході проміжних перетворень при розв’язуванні рівняння (1) автор роботи [4] використав певну апроксимацію, коректність введення якої та її вплив на точність розв’язання потребують дослідження.

Для суцільного покриття широкого діапазону числових значень параметрів α (від 0,5 до 2) та β (більше 0,5) у роботі [5] отримано новий розв’язок рівняння (1):

$$i(t) = I_a \cdot \left(1 - 2 \frac{t}{T}\right) + \left(2I_a - \frac{E_{\text{кОКс}} T}{L_{\text{оКс}}}\right) \times \left(\frac{t}{T}\right)^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \left[\frac{A}{3} \left(\frac{t}{T}\right)^2 + \frac{B}{2} \frac{t}{T} + D\right] \times \frac{1}{\left[\frac{t}{T} \left(1 - \frac{t}{T}\right) + \beta\right] \cdot \left[A \left(\frac{t}{T}\right)^2 + B \left(\frac{t}{T}\right) + D\right]} \quad (4)$$

Тут $A = 2,21[y(0,95) + y(0)] - 3,98$, $B = 3,99 - 2,105y(0) - 1,105y(0,95)$,

$$D = \left(\frac{\sqrt{1+4\beta}-1}{\sqrt{1+4\beta}+1}\right)^{\frac{1}{\sqrt{1+4\beta}}}, \quad y(x) = \left(\frac{\sqrt{1+4\beta}-1+2x}{\sqrt{1+4\beta}+1-2x}\right)^{\frac{1}{\sqrt{1+4\beta}}}, \quad x = t/T.$$

Авторів роботи [5] теж довелося апроксимувати деякі вирази в ході проміжних перетворень, тому точність розв’язку (4) теж потребує дослідження.

Щоб оцінити точність, з якою процитовані наближені розв’язки відтворюють часову залежність струму комутації, необхідно порівняти ці розв’язки з точними результатами принаймні при кількох конкретних сполученнях параметрів двигуна. Вважатимемо точними результати числового розв’язання

безпосередньо вихідного диференціального рівняння (1), урахувавши, що їх точність обмежена лише точністю комп’ютерного математичного середовища, використаного для розрахунків. Моделювання відбувалося таким чином. Спершу розглянуто ситуацію $\alpha = 1$ та $\beta = 1$ відповідно до роботи [4] при $T=2$ мс, $L_{\text{оКс}}=0,2$ мГн, $E_{\text{кОКс}} = 7$ В. Точна крива $i_{\text{ду}}(t)$ та апроксимована крива $i_{\text{л}}(t)$ наведені на рис. 2, графік часової залежності абсолютної похибки апроксимації наведений на рис. 3.

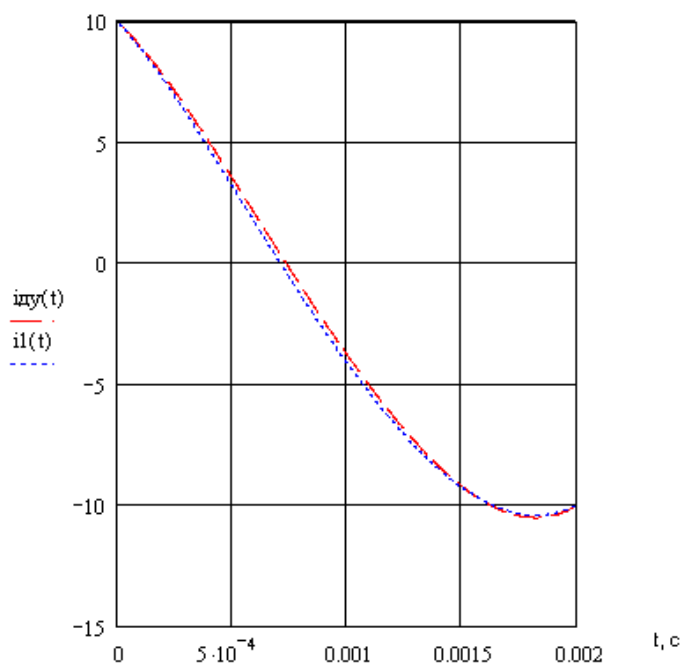


Рис. 2

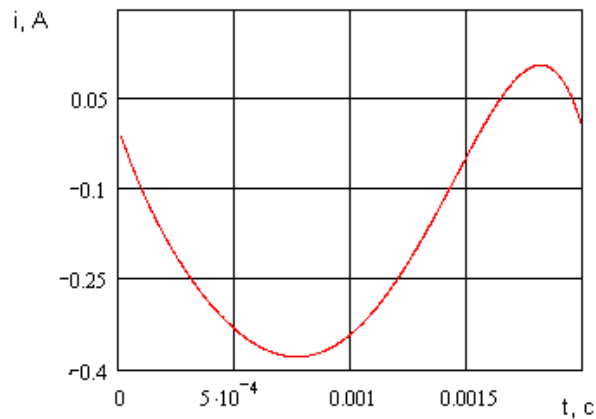


Рис. 3

Після цього розглянуто ситуацію $\alpha = 1$ та $\beta = 20$ відповідно до роботи [4]. Точна крива $i_{ду}(t)$ та апроксимована крива $i_{20}(t)$ наведені на рис. 4, графік часової залежності абсолютної похибки

апроксимації наведений на рис. 5. Як видно, в обох випадках апроксимуючі криві добре відтворюють точну залежність, абсолютна величина похибки становить не більш ніж 0,5 А при струмі якоря 10 А.

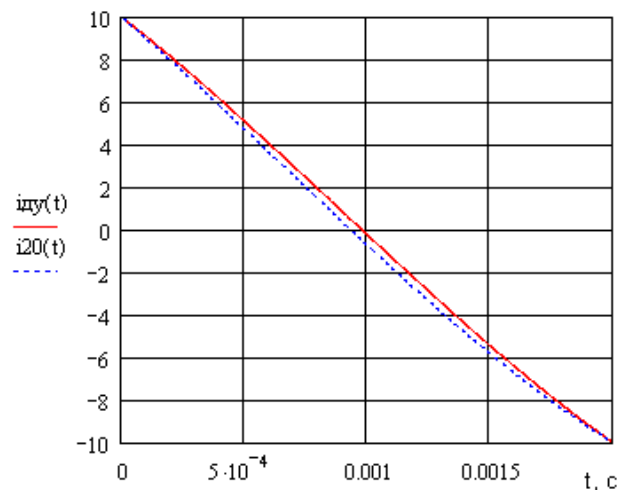


Рис. 4

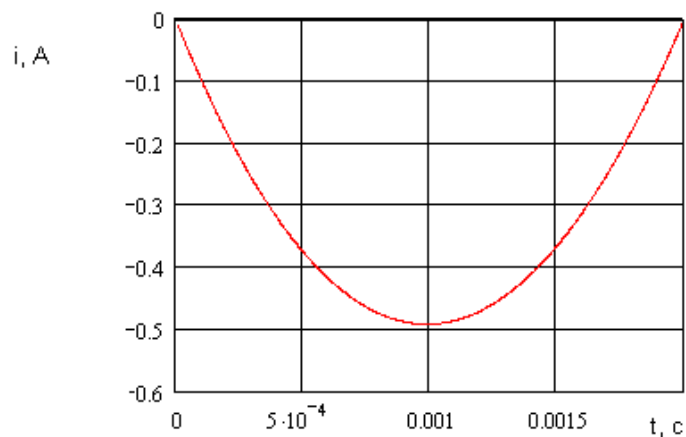


Рис. 5

Потім було розглянуто ситуацію $\alpha = 1$ та $\beta = 1$ відповідно до роботи [5] при $T = 2 \text{ мс}$, $L_{\text{лок}} = 0,2 \text{ мГн}$, $E_{\text{кокс}} = 7 \text{ В}$. Точна крива $i_{\text{ду}}(t)$ та апроксимована крива $i_1(t)$ наведені на рис. 6, графік часової залежності абсолютної похибки апроксимації наведений на рис. 7. Після цього розглянуто ситуацію $\alpha = 1$ та $\beta = 20$ відповідно до роботи [5]. Точна крива $i_{\text{ду}}(t)$ та

апроксимована крива $i_{20}(t)$ наведені на рис. 8, графік часової залежності абсолютної похибки апроксимації наведений на рис. 9. Як видно, за цією методикою точність апроксимації погіршується із зростанням параметра β . Це є ціною узагальнення моделі часової залежності струму.

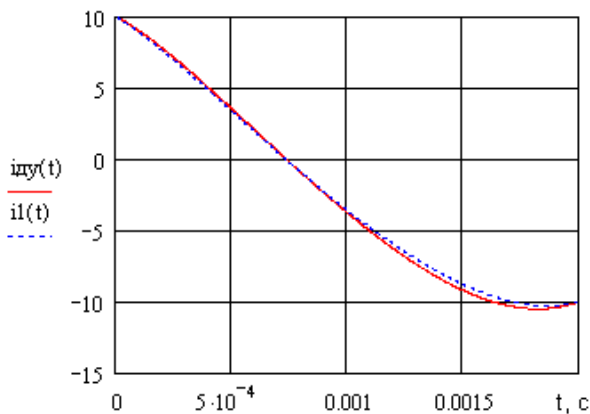


Рис. 6

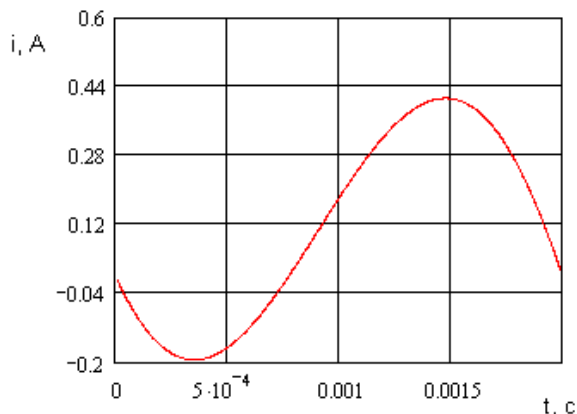


Рис. 7

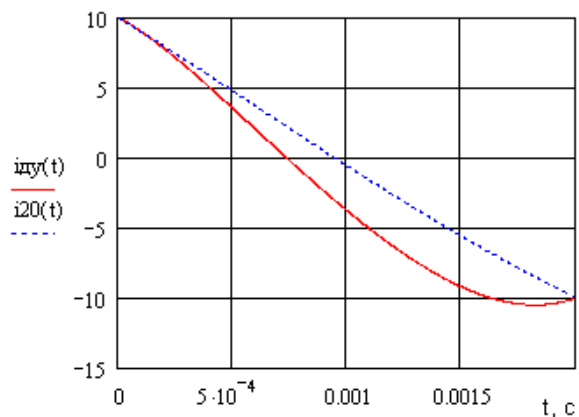


Рис. 8

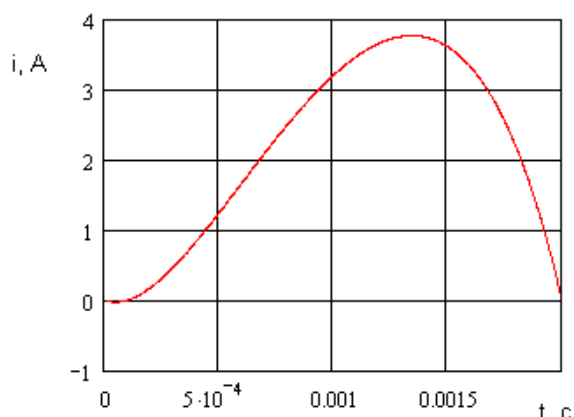


Рис. 9

Висновки. Порівняння моделей комутації показало, що на цей час підбір окремої моделі струму під кожне конкретне сполучення параметрів α та β , які описують ступінь охоплення замиканням секції обмотки якоря, виявився більш прийнятним з погляду точності. Це становить певні незручності, тому що доводиться оперувати

різними виразами для різних сполучень параметрів. Зручною рисою узагальненої моделі є однаковість виразу для часової залежності струму при всіх величинах параметрів секції. Однак необхідно вдосконалити цю модель для покращення її точності в області великих значень параметра β .

Список використаних джерел

1. Карасёв М. Ф., Авилов В. Д., Беляев В. П. и др. Коммутация в тяговых электродвигателях и других коллекторных машинах. *Научные труды*. Омск: Омский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1974. Т. 155. 98 с.
2. Толкунов В. П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. Москва: Энергия, 1979. 224 с.
3. Оптимальная коммутация машин постоянного тока. Под ред. М. Ф. Карасёва. Москва: Транспорт, 1967. 180 с.
4. Давиденко М. Г. Математические модели тока коммутации при наличии короткозамкнутых витков в коммутируемой секции якоря. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2008. № 1. С. 48-57.
5. Давиденко М. Г. Обобщённая математическая модель тока коммутации при наличии короткозамкнутых витков в коммутируемой секции якоря. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2009. № 5. С. 14-19.
6. Isato M. Commutation Phenomena and Brush Wear of DC Motor at High Speed Rotation. *IEICE Transactions on Electronics*. 2017. Vol. E100-C. No. 9. P. 716-722. doi: 10.1587/transele. E100.C.716.
7. Kim Y. S. Commutation Modeling and Characteristic Analysis of DC Motor using Circuit Parameters. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*. 2013. Vol. 62, No. 1. P. 57-62. <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.62.1.057>
8. Rajput P., Rajput P., Vishwakarma M. Service failure analysis of DC Motor Commutator. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016. Vol. 3, Issue 5. P. 2875-2880.

Зінченко Олена Євгенівна, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-19-96. E-mail: lena.zinchenko15@gmail.com.

Флото Ірина Євгенівна, інженер кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-19-96. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Zinchenko Olena, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electroenergy, Electrical Equipment and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730 19 96. E-mail: lena.zinchenko15@gmail.com.

Floto Iryna, Engineer, Department of Electroenergy, Electrical Equipment and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730 19 96. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 22.04.2019 р.

УДК 621.436

НОВИЙ МЕТОД ДИНАМІЧНОГО СИНТЕЗУ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ КУЛАЧКІВ ПРИВОДА КЛАПАНІВ ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ

Д-р техн. наук В. І. Мороз, канд. техн. наук О. В. Братченко, магістр В. І. Громов

NEW METHOD OF DYNAMIC SYNTHESIS OF HIGHLY CAM DRIVE VALVES OF DIESEL

D. Sc. (Tech.) V. I. Moroz, PhD (Tech.) O. V. Bratchenko, Master V. I. Gromov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.171481>

Запропоновано новий метод динамічного синтезу безударних профілів кулачків привода клапанів форсованих транспортних дизелів. Зазначено, що особливістю такого методу є формування базової кривої прискорень штовхача, параметри якої ураховують не тільки умови забезпечення якісних газообмінних процесів у циліндрі, а і встановлені обмеження на виготовлення та характеристики функціонування механізмів привода клапанів. Надано результати профілювання нових кулачків привода клапанів транспортного дизеля ЧН26/27, проведеного з використанням розробленого методу. Показано, що застосування кулачків з новими профілями на працюючому дизелі забезпечить суттєве підвищення часу-перерізу клапанів. Обґрунтовано рекомендації щодо використання розглянутого підходу при конструюванні нових і модернізації існуючих чотиритактних транспортних дизелів.

Ключові слова: транспортні дизелі, привод клапанів, кулачки, динамічний синтез, новий метод.

A new method of dynamic synthesis without shock profiles cams of the drive valves of the forced transport diesels has been proposed. It is noted that the knot torque of such a method is the formation of the basic acceleration curve of the pusher, whose parameters are taken into account not only the conditions for ensuring high-quality gas exchange processes in the cylinder, but also the restrictions on the manufacture and characteristics of the operation of the valve actuator mechanisms are established. Features of the practical implementation of the new method, which involves the implementation of separate stages: the formation of basic technical conditions and restrictions on the cam profiling, determining the basic parameters of the acceleration curve of the pusher in sections of positive and negative values, simulation of the characteristics of the operation of the mechanism of the valve actuator with the cam of the proposed profile. Moreover, the basis for research on determining the basic parameters of the acceleration curve is the generalized mathematical models that are developed using the methods of mathematical planning of the experiment. The results of profiling of new couplings of the drive of the valves of the transport diesel engine D80 conducted using the developed method are presented. It is shown that the application of cam with new profiles on a working diesel engine will significantly increase the time-section of the valves. The materials presented in the article allow solving complex problems of dynamic synthesis of gas-distributing cams of forced transport diesels. Such cams (in comparison with cams, which are profiled by known techniques) provide achievement of extremely high values of time of crossing of valves taking into account corresponding technical, technological constraints, strength requirements, acceptable values of the maximum angle of the cam pressure on the pusher and the coefficient of reserve of valve springs by forces of inertia. The method proposed by the

authors is appropriate to use when creating new and improving existing cam mechanisms for driving the valves of transport diesels.

Keywords: transport diesel engines, valve drive, cam, dynamic synthesis, new method.

Вступ. Одним із перспективних напрямків робіт з поліпшення експлуатаційних показників чотиритактних транспортних дизелів поряд з удосконаленням сумішоутворення, згоряння, теплопередачі є дослідження, спрямовані на поліпшення газообмінних процесів у циліндрах [1, 2]. Найбільш раціональним шляхом практичного рішення зазначеної наукової задачі для чотиритактних двигунів є використання високоефективних безударних кулачків привода клапанів. Профілі таких кулачків мають забезпечувати гранично високі значення часу-перерізу клапанів (ЧПК) з урахуванням відповідних технічних, технологічних обмежень, вимог міцності, прийнятні значення максимального кута тиску кулачка на штовхач і коефіцієнта запасу клапанних пружин за силами інерції [2–4]. Тому за своїм змістом процес профілювання високоефективних безударних газорозподільних кулачків слід розглядати як задачу їх динамічного синтезу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вузловим питанням вирішення сформульованої задачі є формування і отримання математичного опису відповідної кривої зміни прискорень штовхача. Аналіз літературних джерел [1, 5–7] показав, що відомі методи синтезу безударних профілів не забезпечують отримання потрібних, особливо для форсованих транспортних дизелів, значень ЧПК. Водночас використання нових підходів до профілювання високоефективних за величиною ЧПК кулачків ускладнене значною кількістю ділянок кривої прискорень штовхача, що потребує обґрунтованого визначення великої кількості їх відповідних параметрів [8]. Це підтверджує актуальність досліджень з подальшого розвитку теорії динамічного синтезу високоефективних профілів газорозподільних кулачків транспортних форсованих дизелів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є удосконалення процесу динамічного синтезу високоефективних безударних газорозподільних кулачків транспортних дизелів.

Для досягнення поставленої мети необхідним є розроблення нового методу динамічного синтезу кулачків клапанного привода, які при виконанні всіх умов і обмежень на їх профілювання забезпечують гранично високі значення ЧПК транспортних дизелів.

Основна частина дослідження. Авторами запропоновано новий патенто-захищений метод динамічного синтезу високоефективних кулачків привода клапанів дизелів [9], відповідно до якого базовий графік аналогів прискорень штовхача a_{qi} залежно від поточного кута обертання кулачка φ_i ($a-b-c-d-e-f-g-h-i$ на рис. 1) на протязі половини кута дії $\varphi_{д/2}$ складається з чотирьох ділянок: компенсації теплового зазору $a-b$ протяжності φ_0 , додатних прискорень штовхача $b-e$ протяжності φ_1 , від'ємних прискорень штовхача $e-h$ протяжності φ_2 (фазовий кут віддалення $\varphi_{в} = \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2$), половини ділянки верхнього вистою $h-i$ протяжністю $\varphi_{в0}/2$ ($a_{qi}=0$).

Кожна ділянка кривої $a-b-c-d-e-f-g$ описується відповідним ступеневим поліномом.

Ділянка компенсації теплового зазору $a-b$: $0 \leq \varphi_i \leq \varphi_0$

$$a_{qi} = A_0\varphi_i^3 + B_0\varphi_i^2 + C_0\varphi_i; \quad (1)$$

$$v_{qi} = \frac{1}{4}A_0\varphi_i^4 + \frac{1}{3}B_0\varphi_i^3 + \frac{1}{2}C_0\varphi_i^2; \quad (2)$$

$$S_i = \frac{1}{20}A_0\varphi_i^5 + \frac{1}{12}B_0\varphi_i^4 + \frac{1}{6}C_0\varphi_i^3. \quad (3)$$

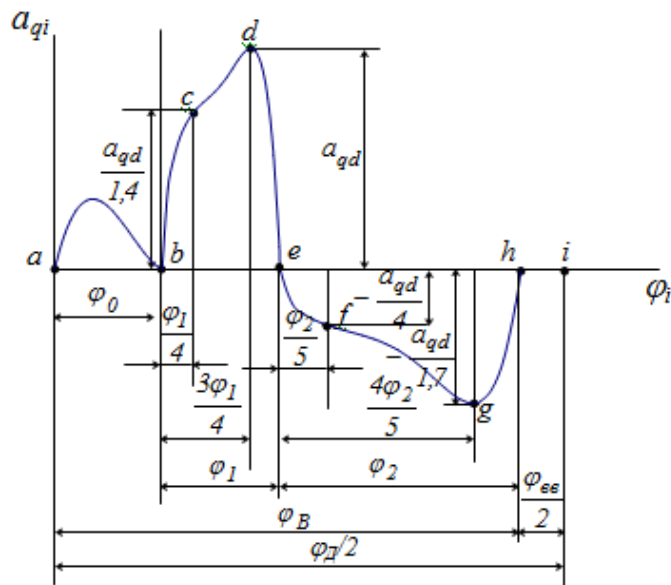


Рис. 1. Вигляд базового графіка аналогів прискорень штовхача нового методу профілювання

Ділянка b-e: $0 \leq \varphi_i \leq \varphi_1$

$$a_{qi} = A_1 \varphi_i^n + B_1 \varphi_i^m + C_1 \varphi_i^p + D_1 \varphi_i^q; \quad (4)$$

$$v_{qi} = \frac{1}{(n+1)} A_1 \varphi_i^{n+1} + \frac{1}{(m+1)} B_1 \varphi_i^{m+1} + \frac{1}{(p+1)} C_1 \varphi_i^{p+1} + \frac{1}{(q+1)} D_1 \varphi_i^{q+1} + v_{qb}; \quad (5)$$

$$S_i = \frac{1}{(n+1)(n+2)} A_1 \varphi_i^{n+2} + \frac{1}{(m+1)(m+2)} B_1 \varphi_i^{m+2} + \frac{1}{(p+1)(p+2)} C_1 \varphi_i^{p+2} + \frac{1}{(q+1)(q+2)} D_1 \varphi_i^{q+2} + v_{qb} \varphi_i + S_b, \quad (6)$$

де v_{qb}, S_b – призначені попередньо значення відповідно до аналога швидкості штовхача (швидкості посадки клапана на сідло) і

теплового зазору в механізмі привода клапанів.

Ділянка e-h: $0 \leq \varphi_i \leq \varphi_2$

$$a_{qi} = A_2 \varphi_i^r + B_2 \varphi_i^s + C_2 \varphi_i^t + D_2 \varphi_i^u. \quad (7)$$

$$v_{qi} = \frac{1}{(r+1)} A_2 \varphi_i^{r+1} + \frac{1}{(s+1)} B_2 \varphi_i^{s+1} + \frac{1}{(t+1)} C_2 \varphi_i^{t+1} + \frac{1}{(u+1)} D_2 \varphi_i^{u+1} + v_{q1e}; \quad (8)$$

$$S_i = \frac{1}{(r+1)(r+2)} A_2 \varphi_i^{r+2} + \frac{1}{(s+1)(s+2)} B_2 \varphi_i^{s+2} + \frac{1}{(t+1)(t+2)} C_2 \varphi_i^{t+2} + \frac{1}{(u+1)(u+2)} D_2 \varphi_i^{u+2} + v_{qe} \varphi_i + S_e, \quad (9)$$

де v_{qe} , S_e – відповідно аналог швидкості і переміщення штовхача в кінці ділянки додатних прискорень (т. e на рис. 1).

Показники ступенів поліномів (4), (7) доцільно приймати з вказаних інтервалів значень, які отримано за результатами пошукових досліджень: $n=1\dots 3$; $m=3\dots 6$; $p=0,3\dots 0,7$; $q=4\dots 6$; $r=0,1\dots 0,5$; $s=1\dots 3$; $t=3\dots 7$; $u=3\dots 9$ [9, 10]. Величини коефіцієнтів A_0, B_0, C_0 визначаються за умов забезпечення потрібних кінематичних параметрів штовхача в точці b (у кінці ділянки $a-b$ на рис. 1) – переміщення штовхача $S_i = S_b$ і аналога швидкості штовхача $v_{qi} = v_{qb}$. Значення коефіцієнтів $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2, D_2$ розраховуються за умов забезпечення потрібних координат характерних точок (рис. 1) a, b, c, d, e, f, g, h кривої аналогів прискорень штовхача (відповідають виконанню відповідних умов на профілювання кулачків). Формули для визначення поточних величин аналогів швидкостей v_{qi} (2), (5), (8) і переміщень S_i штовхача (3), (6), (9) отримані відповідно до інтегрувань і подвійних інтегрувань формул (1), (4), (7) [9].

Практичне використання запропонованого методу потребує опрацювання питань, які пов'язані з раціональним проведенням адаптивних етапів формування базової кривої аналогів прискорень штовхача з урахуванням

відповідних умов на профілювання кулачків [2, 4, 8]:

- кулачок має забезпечувати найбільше значення ЧПК (максимальну величину коефіцієнта повноти діаграми переміщень штовхача η_{II} [2]) при заданій кінематичній схемі привода, куті дії φ_D , максимальному переміщенні штовхача S_{max} ;

- максимальні значення кута тиску β_{max} кулачка на штовхач не мають перевищувати граничних значень $[\beta]$, встановлених для даної схеми механізму привода клапанів ($\beta_{max} \leq [\beta]$);

- запропонований безударний профіль кулачка має відповідати можливостям і умовам сучасних технологій виготовлення: для механізмів з роликівими штовхачами при заданих радіусах початкового кола r_0 і ролика ρ такої вимозі відповідає обмеження мінімального радіуса кривизни увігнутої ділянки профілю R_{min}^{kp} за умов мінімального радіуса шліфувальних кругів $[R_{min}^{kp}]$ ($|R_{min}^{kp}| \leq [R_{min}^{kp}]$);

- мінімальна величина коефіцієнта запасу клапанних пружин за силами інерції k_{zmin} не має бути меншою за встановлене граничне значення ($k_{zmin} \geq [k_{zn}]$).

Авторами запропоновано послідовне формування базової кривої прискорень штовхача (окремо на ділянках додатних і від'ємних прискорень) з варіюванням найбільш впливових змінних при фіксуванні значень інших змінних, встановлених

попередніми пошуковими дослідженнями. Причому здійснення обґрунтованого вибору оптимальних значень варійованих змінних доцільно виконувати на основі сумісного аналізу відповідних узагальнених математичних моделей (УММ),

отриманих з використанням методів математичного планування експерименту [11].

Особливості використання запропонованого методу профілювання газорозподільних кулачків на основі здійснення виділених етапів подано нижче у вигляді блок-схеми (рис. 2).

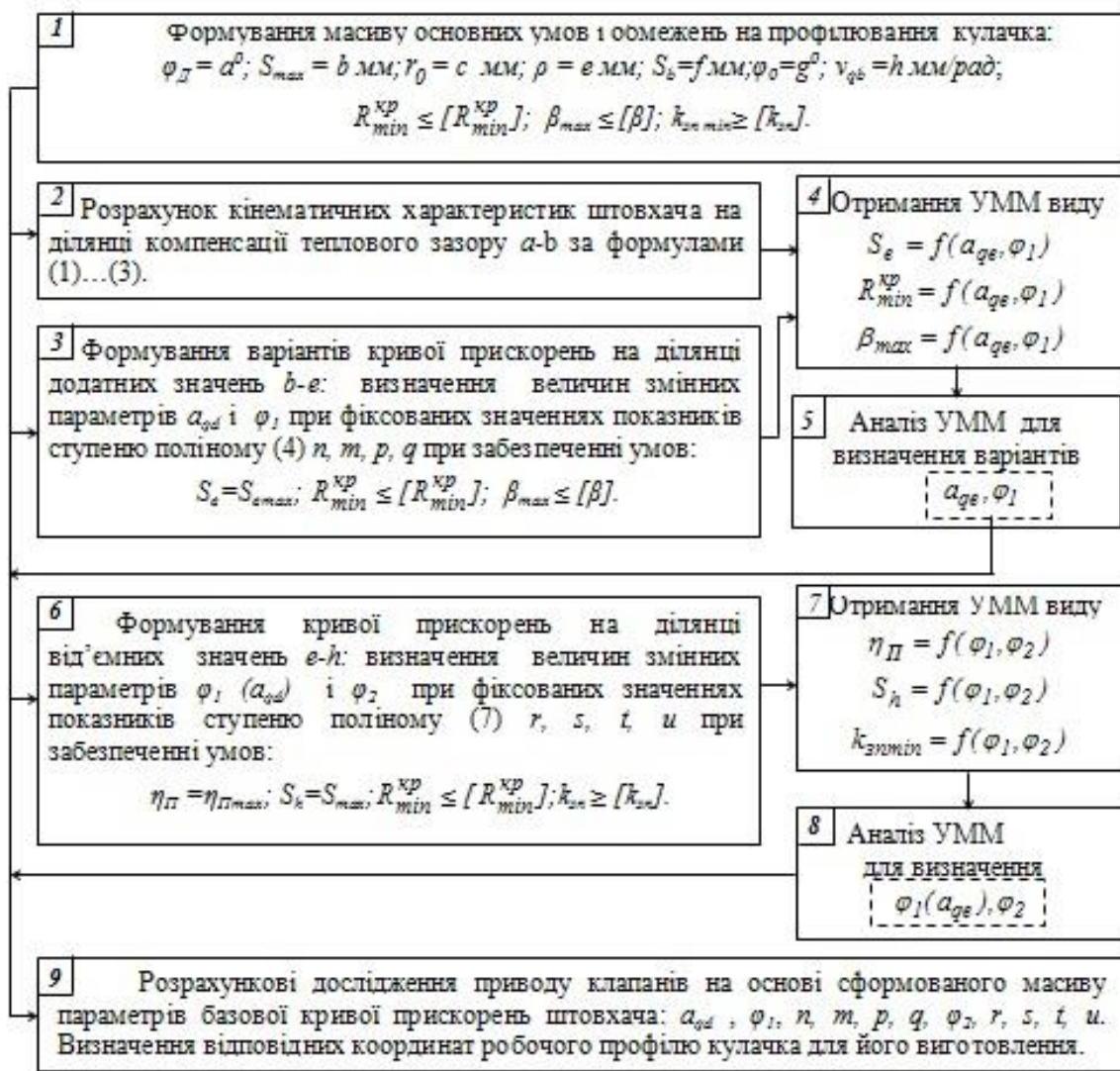


Рис. 2. До розгляду особливостей нового методу динамічного синтезу високоефективних безударних газорозподільних кулачків

Як приклад практичного використання нового методу нижче наведено результати дослідження, спрямованого на удосконалення конструкції розподільного вала транспортного дизеля ЧН 26/27 за рахунок

використання нових високоефективних безударних кулачків привода клапанів.

На основі аналізу конструкторської документації було сформовано масив основних умов і обмежень на

профілювання кулачка: $\varphi_{д/2} = 80,75^{\circ}$;
 $S_{max} = 21,1 \text{ мм}$; $r_0 = 39,5 \text{ мм}$; $\rho = 27 \text{ мм}$;
 $S_b = 0,8 \text{ мм}$; $\varphi_0 = 12^{\circ}$; $v_{qb} = 6 \text{ мм/рад}$;
 $R_{min}^{kp} \leq -170 \text{ мм}$; $\beta_{max} \leq 30^{\circ}$; $k_{zn min} \geq 2,2$.

Формування варіантів кривої прискорень на ділянці додатних значень $b-e$ при фіксованих значеннях показників ступеня полінома (4) $n = 1$; $m = 4$; $p = 0,5$; $q=4,5$ передбачає отримання УММ вигляду:

$S_e = f(a_{qe}, \varphi_1)$, $R_{min}^{kp} = f(a_{qe}, \varphi_1)$,
 $\beta_{max} = f(a_{qe}, \varphi_1)$. В основу такого дослідження покладено ортогональний математичний план другого порядку для двох змінних, що варіюються на трьох рівнях: $a_{qd} = 120 \dots 160 \text{ мм/рад}^2$; $\varphi_1 = 17^{\circ} \dots 23^{\circ}$. Шукані математичні моделі отримані у вигляді поліномів другого порядку і показані нижче:

$$S_e = 7,237 - 0,0466 \cdot a_{qd} - 0,545 \cdot \varphi_1 + 0,000002 \cdot a_{qd}^2 + 0,0162 \cdot \varphi_1^2 + 0,0047 \cdot a_{qd} \cdot \varphi_1; \quad (10)$$

$$R_{min} = -1717,31 + 19,654 \cdot a_{qd} - 1,892 \cdot \varphi_1 - 0,062 \cdot a_{qd}^2 - 0,124 \cdot \varphi_1^2 + 0,0397 \cdot a_{qd} \cdot \varphi_1; \quad (11)$$

$$\beta_{max} = -13,07 + 0,168 \cdot a_{qd} + 1,33 \cdot \varphi_1 - 0,00026 \cdot a_{qd}^2 - 0,0199 \cdot \varphi_1^2 + 0,002 \cdot a_{qd} \cdot \varphi_1. \quad (12)$$

Перевірка адекватності моделей (10)...(12) за величиною дисперсії середньоквадратичного відхилення підтвердила можливість їх використання в подальших дослідженнях.

З використанням УММ (10)...(12) були побудовані поверхні відгуку $S_e = f(a_{qe}, \varphi_1)$, $R_{min}^{kp} = f(a_{qe}, \varphi_1)$, $\beta_{max} = f(a_{qe}, \varphi_1)$ і відповідний бінарний перетин таких поверхонь (рис. 3) [12], що містить лінії рівних значень розглянутих показників у перетинах поверхонь відгуку площинами ($a_{qe} - \varphi_1$). Його аналіз показує, що забезпеченню умов $R_{min}^{kp} \leq -170 \text{ мм}$; $\beta_{max} \leq 30^{\circ}$ відповідає незатінена область графіка. Але для досягнення умови

$S_e = S_{emax}$ при вибраних значеннях кута φ_1 величини максимальних аналогів прискорень мають відповідати точкам, що лежать на обмежувальних лініях 1 або 2.

Отримані результати є основою для формування кривої прискорень на ділянці від'ємних значень $e-h$. Проведення даного етапу при фіксованих значеннях показників ступеня полінома (7) $r=0,3$; $s=25$; $t=14$; $u=1$ передбачає розроблення УММ вигляду $\eta_{II} = f(\varphi_1, \varphi_2)$, $S_h = f(\varphi_1, \varphi_2)$, $k_{zn min} = f(\varphi_1, \varphi_2)$ на основі математичного плану другого порядку для двох змінних, що варіюються на трьох рівнях: $\varphi_1 = 17^{\circ} \dots 23^{\circ}$, $\varphi_2 = 30^{\circ} \dots 38^{\circ}$. Шукані математичні моделі отримано у вигляді поліномів другого порядку і показано нижче:

$$\eta_{II} = 0,9432 - 0,008 \cdot \varphi_1 - 0,002 \cdot \varphi_2 - 0,000063 \cdot \varphi_2^2; \quad (13)$$

$$S_h = -34,079 + 3,66 \cdot \varphi_1 + 0,144 \cdot \varphi_2 - 0,074 \cdot \varphi_1^2 + 0,005 \cdot \varphi_2^2 + 0,0048 \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2; \quad (14)$$

$$k_{3П \min} = 1,827 - 0,202 \cdot \varphi_1 + 0,0736 \cdot \varphi_2 + 0,0018 \cdot \varphi_1^2 - 0,0021 \cdot \varphi_2^2 + 0,0056 \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2. \quad (15)$$

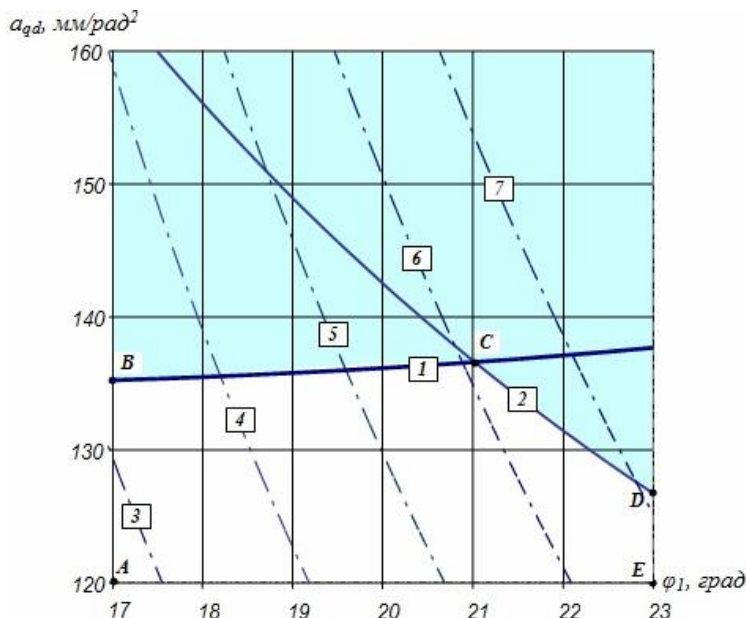


Рис. 3. Бінарний перетин для вибору параметрів кривої аналогів прискорень штовхача на ділянці додатних значень, лінії:

- 1 – $R_{\min} = -170$ мм; 2 – $\beta_{\max} = 30^{\circ}$; 3 – $S_e = 7$ мм; 4 – $S_e = 8$ мм;
5 – $S_e = 9$ мм; 6 – $S_e = 10$ мм; 7 – $S_e = 11$ мм

Перевірка адекватності моделей (13)...(15) за величиною дисперсії середньоквадратичного відхилення підтвердила можливість їх використання в подальших дослідженнях.

З використанням УММ (13)...(15) були побудовані поверхні відгуку $\eta_{П} = f(\varphi_1, \varphi_2)$, $S_h = f(\varphi_1, \varphi_2)$, $k_{3п \min} = f(\varphi_1, \varphi_2)$ і відповідний бінарний перетин таких поверхонь (рис. 4), що містить лінії рівних значень розглянутих показників у перетинах поверхонь відгуку площинами $(\varphi_1 - \varphi_2)$. Його аналіз показує, що забезпеченню вимозі $k_{3п \min} \geq 2,2$ відповідає незатінена область графіка A-B-C-D-E-A, а умові $S_h = 21,1$ мм – лінія 1.

Досягненню умови забезпечення найбільшого ЧПК ($\eta_{П} = \eta_{П \max} = 0,667$) відповідає точка F графіка ($\varphi_1 = 19,3^{\circ}$, $\varphi_2 = 31,4^{\circ}$).

Проведені дослідження дали можливість сформулювати параметри базової кривої аналогів прискорень штовхача, при яких забезпечуються зазначені вище умови і обмеження на профілювання кулачків привода клапанів дизеля ЧН26/27: $a_{qd} = 135,2$ мм/рад²; $\varphi_1 = 19,3^{\circ}$; $n = 1$; $m = 4$; $p = 0,5$; $q = 4,5$; $\varphi_2 = 31,4^{\circ}$; $r = 0,3$; $s = 25$; $t = 14$; $u = 1$. Нижче, на рис. 5 подано кінематичні характеристики штовхача механізму привода клапанів з новим високоефективним безударним кулачком у вигляді графіків переміщень S_i , аналогів v_{qi} швидкостей і прискорень a_{qi} залежно від кута обертання

кулачка φ_i . Для порівняння на рис. 5 пунктиром нанесено графік переміщень штовхача при використанні серійних

безударних кулачків [6], для якого коефіцієнт повноти діаграми переміщень штовхача складає $\eta_{II}=0,602$.

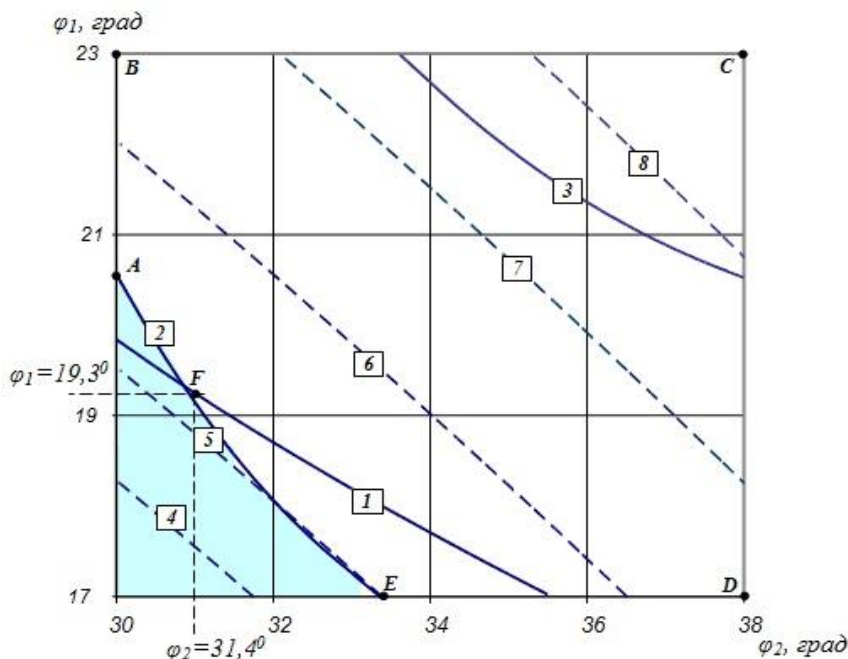


Рис. 4. Бінарний перетин для вибору параметрів кривої аналогів прискорень штовхача на ділянці від'ємних значень, лінії:

- 1 – $S_h=21,1$ мм; 2 – $k_{zn\ min}=2,2$; 3 – $k_{zn\ min}=2,5$; 4 – $\eta_{II}=0,68$; 5 – $\eta_{II}=0,67$;
6 – $\eta_{II}=0,65$; 7 – $\eta_{II}=0,63$; 8 – $\eta_{II}=0,61$

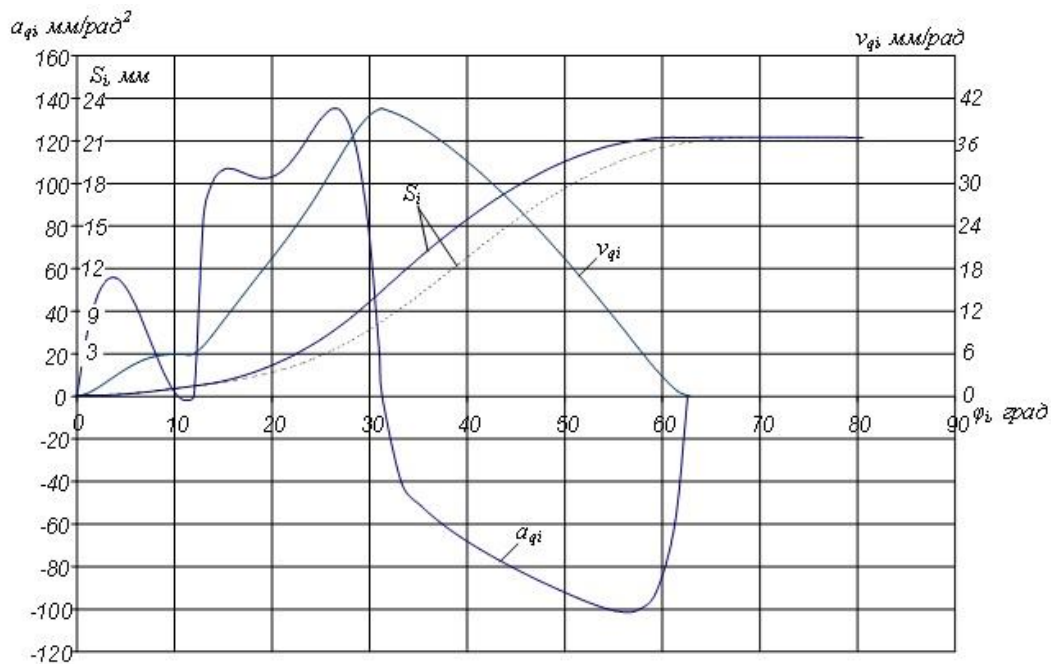


Рис. 5. Кінематичні характеристики штовхача механізму привода клапанів дизеля ЧН26/27 з новим кулачком

Аналіз отриманих результатів показав, що нові кулачки у порівнянні із серійними при виконанні всіх умов на профілювання забезпечують суттєве (до 17 %) збільшення ЧПК транспортних дизелів ЧН26/27.

Висновки. Наведені в статті матеріали дають змогу вирішувати складні задачі динамічного синтезу газорозподільних кулачків форсованих транспортних дизелів. Такі кулачки (у порівнянні з кулачками, які спрофільовані за відомими методиками)

забезпечують досягнення гранично високих значень ЧПК з урахуванням відповідних технічних, технологічних обмежень, вимог міцності, прийнятні значення максимального кута тиску кулачка на штовхач і коефіцієнта запасу клапанних пружин за силами інерції. Запропонований авторами метод доцільно використовувати при створенні нових і удосконаленні існуючих кулачкових механізмів привода клапанів транспортних дизелів.

Список використаних джерел

1. Двигуни внутрішнього згоряння: підручник у 6 т. / за ред. А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцова. Харків: Прапор, 2004. Т.1: Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. 384 с. URL: Marchenko_Dvyhuny_vnutrishnoho_zghoriannia_T_1.pdf.
2. Мороз В. І., Астахова К. В. Розроблення узагальненого формалізованого опису задачі динамічного синтезу безударних профілів кулачків привода клапанів транспортних дизелів. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, 2009. № 111. С. 82–93.
3. Muzakkir S. M. Design of Innovative Engine Valve: Background and Need. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*. 2015. Vol. 4, Issue 3, P. 178-181. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/c995/f3e8344435931ba0774afe6c1eab22b3890a.pdf>.
4. Logvinenko A. A. Peculiarities of stress calculation of basic part of timing gear of modern locomotive electric power installation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. № 6. P. 59-63. URL: metaljournal.com.ua/assets/MMI_2014_6/10-Logvinenko.pdf.
5. Nguyen V. T. Design and manufacturing camshaft using on hybrid vehicles. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 2018. Vol. 9, Issue 6. P. 277–284. URL: <http://www.iaeme.com/IJMET/index.asp>.
6. Эфендиев А. И., Дабкин Я. И. О профилировании кулачка клапанного привода для тепловозного дизеля с высоким наддувом. *Двигатели внутреннего сгорания*. Харьков: Вища школа, 1969. № 9. С. 134–145.
7. Васильев А. В. Повышение эффективности и надежности работы дизельного двигателя путем динамически настроенных кулачков. *Вестник Волгоградского государственного университета*. Серия 10: Инновационная деятельность. Волгоград, 2014. №4 (13). С. 79–85. URL: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu10.2014.4.9>.
8. Іванченко К. В. Поліпшення характеристик функціонування механізму газорозподілу енергетичних установок тепловозів з дизелем Д49 за рахунок використання удосконалених розподільних валів. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, 2015. № 152. С. 168–172. URL: <http://znp.kart.edu.ua/images/arhiv/2015/32.pdf>.
9. Пат. № 104978 Україна МПК F01L 1/08, Кулачок привода клапана. Мороз В. І., Братченко О. В., Громов В. І. (Україна); власник Українська державна академія залізничного транспорту; заявл. 14.06.2012; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.

10. Мороз В. І., Братченко О. В. Динамічний синтез високоефективних профілів газорозподільних кулачків транспортних форсованих дизелів: матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті». *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2017. № 169 (додаток). С. 120-123.

11. Братченко О. В. Узагальнені математичні моделі для динамічного синтезу безударних газорозподільних кулачків тепловозних дизелів *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту*. Донецьк, 2012. № 32. С. 162–166. URL: <http://www.drtdi.donetsk.ua/zbirnik.htm>.

12. Громов В. І. Дослідження поверхонь відгуку показників міцності тягових зубчатих передач з різним ступенем зносу профілів зубців. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. № 168. С. 37–44. URL: <http://csw.kart.edu.ua/article/view/101591/96839>.

Мороз Володимир Ілліч, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри механіки і проектування машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-51.
E-mail: moroz@kart.edu.ua.

Братченко Олександр Васильович, канд. техн. наук, професор кафедри механіки і проектування машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-53.
E-mail: bratchenko@kart.edu.ua.

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

Moroz Volodimir Illich, D. Sc. (Tech.), Professor, Head of Department, Department of Mechanical Engineers and Designing the Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-51.
E-mail: moroz@kart.edu.ua.

Bratchenko Alexander Vasilyevich PhD (Tech.), Professor, Department of Mechanical Engineers and Designing the Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-53. E-mail: bratchenko@kart.edu.ua.

Gromov Volodimir Igorovych, master, Assistant Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrical Mechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-53.
E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 22.04.2019 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.075.23

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ САМОНАПРУЖЕНОГО БЕТОНУ ЯК ЯДРА ДЛІА СТАЛЕБЕТОННИХ КОЛОН КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Кандидати техн. наук Є. І. Галагура, М. О. Ковальов, Л. Б. Кравців, Д. Г. Петренко, асп. І. В. Биченюк

THE EFFICIENCY SELF-STRESSED CONCRETE AS THE CORE FOR SQUARE CROSS-SECTION STEEL-CONCRETE COLUMNS

PhD (Tech.) E. Galagurya, PhD (Tech.) M. Kovalov, PhD (Tech.) L. Kravtsiv, PhD (Tech.) D. Petrenko, postgraduate student I. Bychenok

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.175885>

У статті розглядається ефективність використання самонапруженого бетону як ядра для сталебетонних колон квадратного поперечного перерізу. Для цього на першому етапі було проведено розрахунок сталебетонної колони розмірами 100×100×3 мм, довжиною 500 мм з використанням як ядра перерізу бетону марки С16/20. На наступному етапі дослідження, виходячи з умов однакової несучої здатності колон, був підібраний поперечний переріз з використанням самонапруженого бетону. Також було проведено порівняння характеристик сталебетонних колон з використанням як ядра перерізу звичайного і самонапруженого бетону. Встановлено, що при однаковій несучій здатності вартість колони із самонапруженим бетоном менша від вартості колони зі звичайним бетоном на 20.6 %, вага колони зменшилась на 8.67 %, площа поперечного перерізу зменшилась на 36 %.

Ключові слова: самонапружений бетон, сталебетон, колона, несуча здатність.

The paper considers the efficiency of using self-stressed concrete as a core for steel-concrete columns square section.

On the first step the bearing capacity for steel-concrete column square section 100×100×3 mm length 500 mm with concrete C16/20 as the core was obtained.

At the next stage we determine which cross-section is necessary to obtain the same bearing capacity when using self-stressed concrete as a core.

To determinate bearing capacity of steel-concrete columns the unified method for polygon steel-concrete columns was used. For self-stressed concrete, the prismatic strength of concrete should be replaced with the reduced prismatic strength, taking into account the compressive stresses of concrete in the process of self-stressing and volumetric compressing. The minimum required concrete self-stress ensures the concrete core and steel shell collaboration. To ensure the collaboration the Poisson ratios of the self-stress concrete and steel shell should be equal. This is necessary for optimal design of the construction which takes in account, among other parameters, the consumption of self-stress cement.

The same bearing capacity with using self-stressed concrete will be provided with cross section 80x80x3 mm, length 500 mm. A verification was performed for the section 80x80x3 mm. Bearing capacity for regular concrete was 440 kN and 435 kN for self-stressed concrete.

The concrete composition to produce self-stress concrete with specified characteristics was selected. Portland cement M400, river sand, crushed stone fraction 5-10, Alumina cement and gypsum were used as components for concrete mix. To obtain the Sp-1.2 self-stress grade the consumption of the self-stress cement was chosen.

As a result, the cost of a column with self-stressed concrete is less than the cost of a column with regular concrete by 20.6 %, the weight of the column decreased by 8.67 %, the cross-sectional area decreased by 36 %.

Keywords: Self-stressed concrete, steel-concrete, column, bearing capacity.

Вступ. Сталобетонні конструкції використовують у різноманітних будівлях і спорудах, зокрема як опорні конструкції (колони). У статті подано розрахунки несучої здатності сталобетонної колони з використанням самоупругеного бетону і сталобетонної колони з використанням звичайного бетону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальним та теоретичним дослідженням використання напружених бетонів як ядра сталобетонних конструкцій присвятили свої роботи: Кришан А. Л., Мельничук А. С., Шахворостов А. І., Бондаренко В. М. та інші вчені. Але не всі питання достатньо вивчені. Зокрема недостатньо вивченою є робота сталобетонних колон квадратного поперечного перерізу з ядром із самоупругеного бетону.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є

отримати рівняння для визначення несучої здатності сталобетонної колони з ядром із самоупругеного бетону. Для досягнення сформульованої мети потрібно: визначити напруження, що виникають внаслідок об'ємного обтиску бетону; визначити напруження обтиску бетону в процесі самоупругення; визначити мінімальне необхідне самоупругення для заданого перерізу; підібрати склад бетонної суміші для отримання бетону із заданими характеристиками самоупругення.

Основна частина дослідження. Визначення несучої здатності сталобетонних колон виконуємо, використовуючи уніфікований метод [1] на прикладі колони довжиною $l = 500$ мм із розмірами поперечного перерізу $100 \times 100 \times 3$ мм (рис. 1).

Несуча здатність сталобетонних колон полігонального поперечного перерізу згідно з [1] визначається за формулою:

$$N = f_{sk} \cdot A_{sk} = \left(1 + 0.5 \cdot k_e \cdot \frac{\xi}{1 + \xi} \right) \cdot (f_y \cdot A_s + f_{ck} \cdot A_c), \quad (1)$$

де f_{sk} – узагальнена міцність сталобетонних колон;

A_{sk} – площа перерізу сталобетонної колони;

k_e – приведений коефіцієнт ефективності, $k_e = k_n \cdot k_n$;

k_n – коефіцієнт ефективності пустот (у нашому випадку пустот немає, тому $k_n = 1$);

k_n – коефіцієнт полігональності, який визначається згідно з [1], $k_n = 0.33$;

f_y – межа текучості сталі, $f_y = 220$ МПа;

A_s – площа перерізу сталеві оболонки, $A_s = 11.64 \cdot 10^{-4}$ м²;

f_{ck} – призмова міцність бетону, $f_{ck} = 16$ МПа;

A_c – площа перерізу бетонного ядра, $A_c = 88.36 \cdot 10^{-4}$ м²;

ξ – коефіцієнт приведення, $\xi = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_{ck}}$,

$\xi = 1.81$.

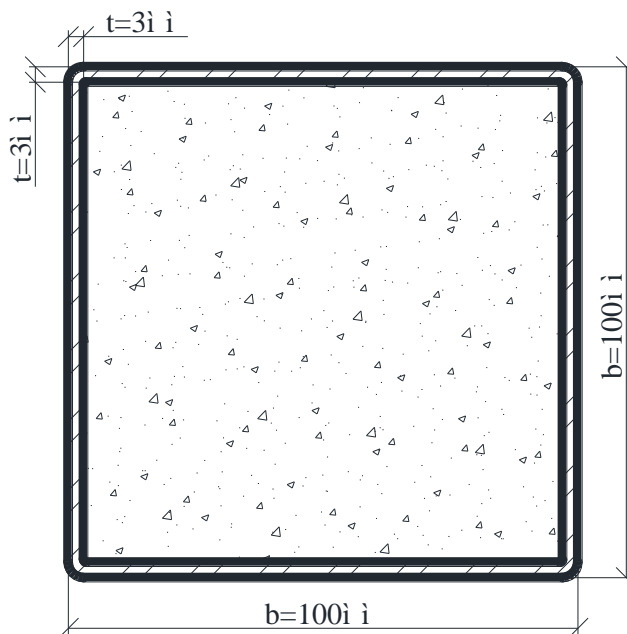


Рис. 1. Поперечний переріз колони

Виконавши розрахунки за формулою (1), отримаємо значення несучої здатності сталобетонної колони:

$$N = \left(1 + 0.5 \cdot 0.33 \cdot \frac{1.81}{1 + 1.81} \right) \cdot (220 \cdot 10^6 \cdot 11.64 \cdot 10^{-4} + 16 \cdot 10^6 \cdot 88.36 \cdot 10^{-4}) = 439.705 \text{ кН.}$$

На наступному етапі дослідження, виходячи з умов однакової несучої здатності колон, підберемо поперечний переріз із використанням самоупругеного бетону.

Для самоупругеного бетону призмову міцність бетону f_{ck} необхідно

замінити на приведену призмову міцність з урахуванням напружень обтиску бетону в процесі самоупругення згідно з [2] σ_{bp} і об'ємного обтиску f_{cku} , тоді формула (1) набуде вигляду:

$$N = f_{ck} \cdot A_{ck} = \left(1 + 0.5 \cdot k_e \cdot \frac{\xi}{1 + \xi} \right) \cdot (f_y \cdot A_s + f_{cku} \cdot A_c). \quad (2)$$

Напруження обтиску бетону σ_{bp} у процесі самоупругення визначається згідно з [3] за формулою:

$$\sigma_{bp} = \overline{R_{bs}} \cdot k_\mu \cdot k_s, \quad (3)$$

де k_s – коефіцієнт тривісного армування, який приймається рівним 1.5;

k_μ – коефіцієнт, який визначається залежно від сумарного коефіцієнта армування, отримаємо за формулою:

$$k_{\mu} = \sqrt{\frac{1.57 \cdot \mu}{0.0057 + \mu}}; \quad (4)$$

μ – сумарний коефіцієнт армування, який визначається за формулою:

$$\mu = \frac{A_s}{A_c}; \quad (5)$$

$\overline{R_{bs}}$ – величина самонапруження напруженого бетону для забезпечення сумісної роботи бетонного ядра і сталеві оболонки згідно з методикою [4]; сумісна робота буде забезпечена, коли коефіцієнти Пуассона бетонного ядра та сталеві оболонки стануть рівними.

Мінімально необхідна величина обтиску бетонного ядра визначається за формулою:

$$\sigma_{bp(\min)} = 10 \cdot \mu. \quad (6)$$

$$R_{bm} = f_{ck} \cdot \left[1 + \xi_p \cdot \gamma_p \cdot \left(\frac{\overline{\sigma} - 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{\overline{\sigma} - 1}{2} \right)^2 + 10 \cdot \overline{\sigma}} \right) \right]. \quad (9)$$

Призмову міцність бетону виразимо через міцність бетону, що твердне в обмежених умовах R_{bpn} , тоді:

$$f_{cku} = R_{bpn} \cdot \left[1 + \xi_p \cdot \gamma_p \cdot \left(\frac{\overline{\sigma} - 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{\overline{\sigma} - 1}{2} \right)^2 + 10 \cdot \overline{\sigma}} \right) \right], \quad (10)$$

де γ_p – коефіцієнт, який враховує умови роботи сталеві оболонки сталобетонної колони квадратного поперечного перерізу:

$$\gamma_p = \alpha_1 \cdot \alpha_2; \quad (11)$$

Для визначення міцності бетону, що твердіє в обмежених умовах, використовуємо методику, наведену у [2]:

$$R_{bpn} = f_{ck} + \alpha \cdot \sqrt{\Delta f \cdot \sigma_{bp}}, \quad (7)$$

де α – коефіцієнт, який залежить від складу бетонної суміші, $\alpha \approx 1$;

Δf – поправковий коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$\Delta f = \frac{0.44}{\sqrt{f_{ck}}}. \quad (8)$$

Оскільки самонапружений бетон, перебуваючи в об'ємі, набуває складного об'ємно-напружений стану, то необхідно визначити міцність об'ємно-стиснутого бетону R_{bm} , який розраховується згідно з [5] за формулою:

α_1 – коефіцієнт, що визначає частку розтягуювальної складової від загальної деформації стінки труби-оболонки в граничному стані, $\alpha_1 = 0.84$;

α_2 – коефіцієнт, що враховує величину зміцнення холодногнутих профілів і

розрахований за формулою К. Карена і Дж. Вінтера [2] $\alpha_2 = 1.1$.

$$\gamma_p = 0.84 \cdot 1.1 = 0.924;$$

$\bar{\sigma}$ – відносна величина бокового тиску з боку сталеві оболонки на бетонне ядро в граничному стані, визначається за формулою:

$$\bar{\sigma} = \frac{3 \cdot \rho}{6.67 + \rho}, \quad (12)$$

де ρ – конструктивний коефіцієнт трубобетону, який визначається за формулою:

$$\rho = \frac{f_y \cdot A_s}{R_{bpn} \cdot A_{sk}}, \quad (13)$$

де ξ_p – коефіцієнт, що враховує неоднорідність розподілу головних напружень за нормальним перерізом ядра, який визначається за формулою:

$$\xi_p = \left(1 - 0.01 \cdot \frac{b}{t}\right)^2. \quad (14)$$

Підставивши всі значення в рівняння (2), отримаємо графік залежності ширини оболонки від товщини стінки (рис. 2) для несучої здатності 440 кН з забезпеченням мінімального самонапруження.

Виходячи з умов однакової несучої здатності і з забезпеченням мінімального самонапруження вибираємо переріз 80×80×3 мм згідно з [6].

Виконуємо перевірку та визначаємо самонапруження, яке необхідне для забезпечення заданої несучої здатності за формулою (2), враховуючи характеристики підбраного поперечного перерізу ($A_s = 9.24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $A_c = 54.76 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $\xi = 0.968$).

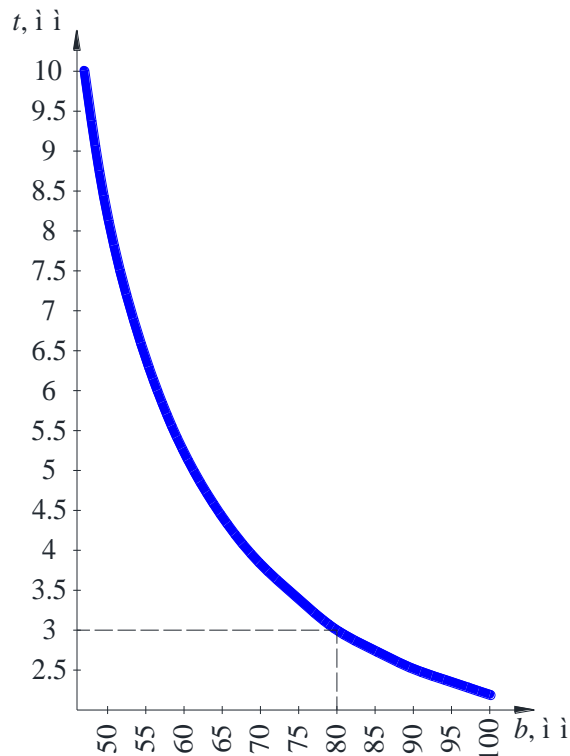


Рис. 2. Графік залежності ширини оболонки від товщини стінки

Використовуючи формулу (6), визначаємо мінімально необхідну величину обтиску бетонного ядра, для цього необхідно розрахувати коефіцієнт армування за формулою (5).

$$\mu = \frac{9.24 \cdot 10^{-4}}{54.76 \cdot 10^{-4}} = 0.16;$$

$$\sigma_{bp(\min)} = 10 \cdot 0.16 = 1.6 \text{ МПа.}$$

Визначаємо необхідну величину самонапруження з рівняння (3), де коефіцієнт, який визначається залежно від сумарного коефіцієнта армування, розраховується за формулою (4):

$$k_\mu = \sqrt{\frac{1.57 \cdot 0.16}{0.0057 + 0.16}} = 1.23;$$

$$\bar{R}_{bs} = \frac{1.6}{1.23 \cdot 1.5} = 0.86 \text{ МПа.}$$

$\overline{R_{bs}} = 0.86$ МПа, що згідно з [2] відповідає марці за самонапруженням Sp1.2 з величиною самонапруження $\overline{R_{bs}} = 0.96$ МПа. Тоді величина обтиску бетону:

$$\sigma_{bp} = 0.96 \cdot 1.23 \cdot 1.5 = 1.77 \text{ МПа.}$$

Для визначення міцності бетону, що твердіє в обмежених умовах, скористаємося формулами (7) і (8):

$$\Delta f = \frac{0.44}{\sqrt{16}} = 0.11;$$

$$R_{bpn} = 16 + 1 \cdot \sqrt{0.11 \cdot 1.77} = 16.44 \text{ МПа.}$$

Для визначення міцності об'ємно-стиснутого бетону використаємо формулу (10), де невідомі знайдемо з формул (11–14):

$$\rho = \frac{220 \cdot 10^6 \cdot 9.24 \cdot 10^{-4}}{16.44 \cdot 10^6 \cdot 64 \cdot 10^{-4}} = 1.93;$$

$$\overline{\sigma} = \frac{3 \cdot 1.93}{6.67 + 1.93} = 0.67;$$

$$\xi_p = \left(1 - 0.01 \cdot \frac{0.08}{0.003} \right)^2 = 0.54;$$

$$f_{cku} = 16.44 \cdot \left[1 + 0.54 \cdot 0.924 \cdot \left(\frac{0.67 - 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{0.67 - 1}{2} \right)^2 + 10 \cdot 0.67} \right) \right] = 36.36 \text{ МПа.}$$

Тоді несуча здатність сталобетонної колони квадратного поперечного перерізу з

ядром із самонапруженого бетону марки Sp1.2:

$$N = \left(1 + 0.5 \cdot 0.33 \cdot \frac{0.968}{1 + 0.968} \right) \cdot (220 \cdot 10^6 \cdot 9.24 \cdot 10^{-4} + 36.36 \cdot 10^6 \cdot 54.76 \cdot 10^{-4}) = 435.044 \text{ кН}$$

Для отримання самонапруженого бетону марки Sp1.2, згідно з рекомендаціями [7], визначимо необхідну кількість напруженого цементу (НЦ) за формулою:

$$C = 550 \cdot \left(\frac{\overline{R_{bsn}}}{R_{cp}} \right)^2 + 450, \quad (15)$$

де $\overline{R_{bsn}}$ – нормативне самонапруження бетону, що дорівнює його проектній марці

за самонапруженням, з помноженням на поправковий коефіцієнт 1.2;

R_{cp} – активність НЦ за самонапруженням, отримана при випробуванні згідно з [8], $R_{cp} = 4$ МПа.

Необхідна кількість води для замішування визначається орієнтовно залежно від кількості цементу за формулою:

$$B = 0.18 \cdot C + 135. \quad (16)$$

Решта компонентів бетонної суміші визначається відповідно до [9]. Для отримання 1 м³ самоупругеного бетону марки Sp1.2 необхідно: води – 224 л, НЦ – 496 кг, піску річкового – 1042 кг, щебеню фракції 5-10 – 1933 кг.

Витрата матеріалів для отримання НЦ згідно з [8]: портландцемент М400 – 83 %, глиноземистий цемент ГЦ-40 – 10 %, гіпс будівельний – 7 %.

Порівняння вартості і характеристик сталобетонних колон подано в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння сталобетонних колон

Найменування	Сталобетонна колона з ядром зі звичайного бетону 100×100×3 мм, l=0.5 м	Сталобетонна колона з ядром із самоупругеного бетону 80×80×3 мм, l=0.5 м	Δ, %
Несуча здатність, кН	440	435	1,14
Вартість бетону, грн*	8.07	10.66	32.09
Вартість оболонки, грн*	130.8	99.60	23.85
Вартість колони усього, грн	138.87	110.26	20.6
Вага колони, кг	14.99	13.69	8.67
Площа колони м ²	1·10 ⁻²	0.64·10 ⁻²	36

* Ціни взято з мережі інтернет станом на 25.03.2019 р.

Висновки. У статті наведено результати розрахунку несучої здатності колон при використанні самоупругеного та звичайного бетону. Колона із самоупругеним бетоном розраховувалася так, щоб її несуча здатність була еквівалентна колоні зі звичайним бетоном. Для цього в роботі побудовано графік

залежності ширини оболонки від товщини стінки із забезпеченням мінімального самоупругення і заданої несучої здатності. Також було проведено порівняння вартості та характеристик сталобетонних колон зі звичайного бетону та самоупругеного.

Список використаних джерел

1. Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao Ye. A unified formulation for circle and polygon concrete filled steel tube columns under axial compression. *Engineering Structures*. 2013. № 49. P. 1–10.
2. Кришан А. Л. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром: дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Магнитогорск. 2011. 335 с.
3. Посібник до СНиП 2.03.01-84. Посібник з проектування самоупругених залізобетонних конструкцій (до СНиП 2.03.01-84). [Чинний від 1985-05-08]. Москва, 1986. 49 с. (Інформація та документація).
4. Шахворостов А. И. Исследование напряжённо-деформированного состояния трубобетона на напрягающем цементе: дисс... канд. техн. наук: 05.23.01. Москва. 2000. 159 с.
5. Мельничук А. С. Прочность коротких трубобетонных колонн квадратного поперечного сечения: дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Магнитогорск. 2014. 191 с.
6. ГОСТ 8639-82 Трубы стальные квадратные. Сортамент. [Чинний від 1983-01-01]. Москва, 1982. 7 с. (Інформація та документація).
7. Рекомендации по применению бетонов на напрягающем цементе в монолитном и сборно-монолитном строительстве / НИИЖБ Москва. 1987. 17 с.

8. Савеня Д. Н., Соловьев Д. А., Плосконосов В. Н. Особенности прочностных и деформационных характеристик напрягающего цемента, модифицированного добавкой нитрата кальция. *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2009. № 6. С. 53–56.

9. ДСТУ Б В.2.7-215:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний від 2010-09-01]. Київ. 2010. 18 с. (Інформація та документація).

Галагурия Євгеній Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (067)9384346. E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com.

Ковальов Максим Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (050)633-50-81. E-mail: maks_kov@ukr.net.

Кравців Лариса Богданівна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (050)160-62-24. E-mail: Laura_Kravtsiv@ukr.net.

Петренко Дмитро Григорович, канд. техн. наук, асистент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (099)467-58-46. E-mail: petrenko_dmytro@ukr.net.

Биченок Ігор Володимирович, аспірант кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (063)706-07-22. E-mail: igorbuchenok2111@gmail.com.

Galagurya Evgeniy, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (067)9384346. E-mail: evgeniygalagurya@gmail.com.

Kovalov Maksym, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (050)633-50-81. E-mail: maks_kov@ukr.net.

Kravtsiv Larysa, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (050)160-62-24. E-mail: Laura_Kravtsiv@ukr.net.

Petrenko Dmytro, PhD (Tech.), Assistant lecturer, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (099)467-58-46. E-mail: petrenko_dmytro@ukr.net.

Bychenok Ihor, Postgraduate Student, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (063)706-07-22. E-mail: igorbuchenok2111@gmail.com.

Статтю прийнято 13.03.2019 р.

УДК 624.012.3/4:69.059

ДО ПИТАННЯ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ЗГИНАЮТЬСЯ

Кандидати техн. наук **О. О. Довженко, В. В. Погрібний (ПолтНТУ), начальник ПКВ В. Г. Кобылицький (АТ «Укртранснафта»), студент Т. О. Совенко (ПолтНТУ)**

TO THE QUESTION OF THE TECHNICAL CONDITION EVALUATION OF BENDING REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS

PhD (Tech.) O. Dovzhenko, PhD (Tech.) V. Pohribnyi, head of PCED V. Kobyletskyi, student T. Sovenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176097>

Вказано на неоднозначність у визначеннях категорій технічного стану будівельних конструкцій. Для залізобетонних конструкцій наведено уточнені формулювання категорій, в яких усунуто неоднозначність їх трактувань. Запропоновано додаткові класифікаційні ознаки технічного стану. На основі результатів дворівневого оцінювання несучої здатності

встановлено межу між не придатним до нормальної експлуатації та аварійним станами. Обґрунтовано перспективність використання екстремальних властивостей деформації бетону для вдосконалення розрахунку несучої здатності згинальних елементів.

Ключові слова: категорія технічного стану, несуча здатність, дворівневе оцінювання, екстремальні властивості деформації.

It is indicated on the ambiguity of the categories definition characterizing the technical condition of building structures. The phrases "the impossibility of guaranteeing the integrity of the structure" and "the possibility of ensuring its integrity" in the existing wording of the categories in standards lead to an intuitive installation of them, which may lead to errors. For reinforced concrete structures, the specified wording of categories is given, in which the ambiguity of their interpretations is eliminated. On the basis of the results of two-level evaluation of the bearing capacity, a boundary between the unsuitable for normal operation and the emergency technical conditions is determined. It is offered to determine the state of structure as unsuitable for normal operation, when the bearing capacity of this structure is not provided by current standards, but it is provided by the normative method that it was preceded and operated for many years. To the emergency state should be attributed the structures, bearing capacity of which is not provided in both methods. The pointed out does not contradict the current standards, but it establishes a clear line between these states. Additional classification marks of technical condition are suggested. The prospect of using the theory of plasticity and extreme properties of concrete deformation parameters for the improvement of the method of calculating the bearing capacity of bending reinforced concrete elements are substantiated. To calculate the elements in the normal section according to the nonlinear deformation model, an important role is played by the determination of the values of the limit concrete strain in the most compressed fibers, in excess of which there is the restructuring of concrete. To determine the limit of the restructuring, it is proposed to apply the criterion for maximum deformation energy. To determine the value of the ultimate loading under the shear, a variational method in the theory of plasticity and an upper bound of the limit load value are used, which corresponds to the minimum of the power of plastic strain. The results of calculating the strength of concrete and reinforced concrete elements are confirmed experimentally. It should be noted that the localization of plastic deformation in thin layers on the surface of elements destruction is realized also in less plastic high-strength concretes.

Keywords: category of technical condition, bearing capacity, two-level evaluation, extreme properties of deformations.

Вступ. Для забезпечення надійної експлуатації будівельних конструкцій важливе значення має обґрунтована оцінка їх технічного стану. Особливої ролі вона набуває за наявності дефектів і пошкоджень, які впливають на несучу здатність, невідповідності характеристик міцності матеріалів конструкцій проектному рішенню та при збільшенні навантажень у результаті реконструкції й технічного переоснащення будівель і споруд. Ефективність захисту, ремонту, підсилення та підвищення експлуатаційної надійності конструкцій залежить від точності встановлення категорій їх

технічного стану, що визначають перелік необхідних заходів. Із наданням чинності нормативним документам [1–3] суттєво збільшилися значення снігового навантаження та коефіцієнтів надійності будівель і споруд за відповідальністю, при застосуванні яких запаси міцності конструкцій виявляються частково або повністю вибраними. Тому для експлуатаційної надійності, насамперед складних об'єктів з підвищеною відповідальністю, до яких належить велика кількість споруд залізничного транспорту з безперервним режимом роботи або термін припинення експлуатації яких обмежений,

своєчасність та ефективність запобіжних заходів щодо збереження конструкцій і об'єктів у цілому є визначальними. Вказане обумовлює актуальність цього дослідження для будівельної галузі. Особливо це стосується широко розповсюджених на практиці конструкцій, що згинаються, розрахунок яких доволі складний, і на їх несучу здатність впливає велика кількість факторів. Для обґрунтованої оцінки необхідно, з одного боку, забезпечити однозначність формулювання категорій, які характеризують технічний стан, а з іншого – вдосконалити методи розрахунку конструкцій на основі деформаційної та дискової моделей і фермової аналогії. Перспективним є використання екстремальних властивостей деформування і теорії пластичності бетону.

Аналіз останніх досліджень і наукових публікацій. Урахуванню впливу різних факторів на технічний стан конструкцій останнім часом присвячено цілу низку наукових досліджень. Так, вплив небезпечних геологічних процесів досліджено в [4], динамічних навантажень на конструкції великих прогонів та їх стикові з'єднання – у [5], високих температур – у [6], пошкоджень залізобетонних конструкцій з поглибленим моніторингом технічного стану та визначенням залишкової здатності в [7–9], на важливість ймовірнісного підходу наголошено в [10]. Отримано вагомі досягнення у вирішенні питань визначення технічного стану, але в нормах [11] залишилася певна неоднозначність встановлення категорій, які характеризують не придатний до нормальної експлуатації та аварійний стани.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є підвищення точності визначення категорій технічного стану залізобетонних конструкцій, що згинаються. Для її досягнення вирішуються завдання усунення неоднозначності при встановленні категорій, внесення додаткових кваліфікаційних ознак технічного стану, використання

дворівневого оцінювання несучої здатності конструкцій та удосконалення методики їх розрахунку на основі застосування екстремальних властивостей параметрів деформації.

Основна частина дослідження. Технічний стан окремих конструкцій та будівель і споруд у цілому визначається сукупністю якісних та кількісних експлуатаційних показників. Вони порівнюються із параметрами, заданими в нормативній і проектній документації, та характеризують експлуатаційну придатність.

Дослідження присвячено вивченню роботи залізобетонних конструкцій, що згинаються, як найбільш поширених у практиці. Запит на удосконалення методики оцінювання їх технічного стану обумовлено наданням чинності як нормативним документам [1–3], що підвищують значення навантажень і коефіцієнтів відповідальності об'єктів, так і нормам з розрахунку конструкцій [12]. При цьому одержані за чинними нормами результати суттєво відрізняються від отриманих за попередньою нормативною методикою [13], якою користувалися понад 30 років і за якою запроєктовано велику кількість існуючих об'єктів.

На першому етапі обстеження технічний стан конструкцій оцінюється за наведеним в [11] переліком кваліфікаційних ознак, які його характеризують. Аналіз результатів обстежень залізобетонних конструкцій будівель і споруд вказує на доцільність доповнення вказаного переліку низкою додаткових ознак. Так, замочування з порушенням монолітності бетону (рис. 1) знижує зчеплення захисного шару бетону з арматурою, що у подальшому призводить до її корозії, і стан конструкцій слід оцінювати як задовільний – категорія «2». За наявності тріщин уздовж арматури та слідів іржі на поверхні бетону в зоні її анкерування (рис. 2) технічний стан конструкції може характеризуватися як категорією «2», так і категоріями «3» – стан не придатний до нормальної експлуатації

або «4» – аварійний, що обумовлює необхідність невідкладного його встановлення за результатами докладного інструментального обстеження.

Надалі категорію технічного стану уточнюють за результатами розрахунку несучої здатності й огорожувальної спроможності. За чинними нормами [11] категорії, що характеризують технічний стан конструкцій при зниженні їх несучої

здатності, однозначно класифікувати складно. Наявність у формулюваннях категорій аварійного та не придатного до нормальної експлуатації технічних станів конструкцій виразів відповідно «неможливість гарантувати цілісність конструкції» та «можливість забезпечення її цілісності» не дає чіткого критерію щодо їх розмежування.



Рис. 1. Замочування двосхилої балки та ребристих плит покриття



Рис. 2. Оголення та корозія арматури плити перекриття в зоні анкерування

Разом з тим слід зазначити, що попередні норми з розрахунку залізобетонних конструкцій [13], визначення значень навантажень та впливів [14] і рівня надійності об'єктів [15] створили нормативну на час їх дії базу для

проектування та умови забезпечення тривалого терміну безаварійної і надійної експлуатації конструкцій та будівель і споруд у цілому. З введенням чинного пакета норм [1–3, 12] рівень навантажень і впливів, за якого несуча здатність

конструкцій, що згинаються, забезпечена, значно знижений. Це створює суттєві проблеми щодо обґрунтованого визначення технічного стану існуючих конструкцій, які запроектовані за попередніми нормами [13–15], та їх подальшої надійної експлуатації. Вказане обґрунтовує необхідність уточнення формулювання категорій не придатного до нормальної експлуатації й аварійного станів залізобетонних конструкцій. Пропонується наведена нижче редакція.

Технічний стан конструкції не придатний до нормальної експлуатації – категорія "3": несуча здатність конструкції за ДБН В.2.6-98:2009 з дотриманням вимог ДБН В.1.2-2:2006 і ДБН В.1.2-14-2009 не забезпечена, але при перевірних розрахунках за методикою СНиП 2.03.01-84* з дотриманням вимог СНиП 2.01.07-85 і ГОСТ 27751-88 забезпечена, або неможлива реалізація захисних функцій за наявності фізичного зносу, який менше або дорівнює 60 %.

Технічний стан конструкції аварійний – категорія "4": несуча здатність конструкції незабезпечена як за методикою ДБН В.2.6-98:2009 з дотриманням вимог ДБН В.1.2-2:2006 і ДБН В.1.2-14-2009, так і за методикою СНиП 2.03.01-84* з дотриманням вимог СНиП 2.01.07-85 і ГОСТ 27751-88, або остаточно втрачена можливість реалізації захисних функцій конструкції при фізичному зносі, що перевищує 60 %.

Таким чином, факт незабезпечення несучої здатності конструкцій засвідчу-

ється перевірними розрахунками за ДБН В.2.6-98:2009, а ступень небезпеки її зниження – за СНиП 2.03.01-84*. Тобто пропонується дворівневе оцінювання несучої здатності, що вносить однозначність у визначення категорій технічного стану конструкцій. При цьому виникає необхідність уточнення цих рівнів шляхом удосконалення методів розрахунку залізобетонних конструкцій на основі найбільш перспективних і поширених деформаційної та дискової моделей і «фермової аналогії». Одним із шляхів удосконалення є використання екстремальних властивостей деформації та теорії пластичності бетону.

При розрахунку згинальних елементів у нормальному перерізі за нелінійною деформаційною моделлю важливу роль відіграє встановлення значень граничної деформації бетону в найбільш стиснутій фібрі, при перевищенні яких відбувається його деструктуризація. Для визначення межі деструктуризації пропонується застосувати критерій максимуму енергії деформування.

Як залежність між напруженнями σ_c та деформаціями ε_c бетону в [12] прийнято дробово-раціональну функцію. За похідною функції енергії деформування

$$\frac{\partial \sigma_c \varepsilon_c}{\partial \varepsilon_c} = 0 \quad (1)$$

отримана залежність для визначення граничної деформації бетону

$$\varepsilon_{cu} = \frac{\varepsilon_{c1}}{2k-4} \left[\sqrt{\left(\frac{k^2 - 2k - 3}{2} \right)^2 + 4k^2 - 8k + \frac{k^2 - 2k - 3}{2}} \right], \quad (2)$$

де $k \neq 2$ – параметр дробово-раціональної функції, що характеризує властивості бетону та визначається за [12] (при $k = 2 \varepsilon_{cu} = 4\varepsilon_{c1} / 3$).

Зрізна форма руйнування в межах умовного бетонного елемента та стиснутої зони над небезпечною тріщиною у похилому перерізі обумовлює

перспективність використання для розрахунку міцності на дію поперечної сили теорії пластичності. Передумови її використання до бетону наведені в [16, 17]. Для визначення величини граничного навантаження при зрізі використовується варіаційний метод у теорії пластичності [18, 19] та верхня оцінка граничного рівня навантаження, який відповідає мінімуму потужності пластичної деформації. Результати розрахунку міцності бетонних та залізобетонних елементів підтверджені експериментально [20–22]. При цьому слід зазначити, що локалізація пластичної деформації у тонких шарах на поверхні руйнування елементів реалізується і у менш пластичних високоміцних бетонах [22].

Висновки. У нормативних документах існує певна неоднозначність трактувань категорій не придатного до нормальної експлуатації й аварійного технічних станів існуючих будівель і споруд, що зменшує ефективність проведення заходів щодо їх ремонту та підсилення.

Уточнено формулювання категорій технічного стану залізобетонних конструкцій, що згинаються, при зниженні їх несучої здатності, що однозначно його характеризують. Рекомендовано як не

придатний до нормальної експлуатації розглядати стан, при якому несуча здатність конструкцій не забезпечена за результатами розрахунку згідно з чинними нормами та забезпечена при оцінюванні за нормативною методикою, що їм передувала. До аварійного стану слід відносити конструкції, несуча здатність яких не забезпечена за обома методиками. Дворівневе оцінювання дозволить вилучити з опису категорій технічного стану формулювання «неможливість гарантувати цілісність» та «можливість забезпечення цілісності», які не мають точної кількісної оцінки.

Для попереднього визначення технічного стану конструкцій в існуючий перелік пропонується внести додаткові кваліфікаційні ознаки.

Підвищення точності оцінювання технічного стану залізобетонних конструкцій за несучою здатністю полягає в удосконаленні методів їх розрахунку з використанням нелінійної деформаційної та дискової моделей і «фермової аналогії» на основі теорії пластичності й екстремальних властивостей деформації бетону та встановленні обґрунтованих меж застосування кожної з них.

Список використаних джерел

1. ДБН В.1.2-2: 2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинний від 2007-01-01]. Київ, 2006. 60 с.
2. ДБН В.1.2-14-2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. [Чинний від 2009-12-01]. Київ, 2009. 30 с.
3. ДСТУ-Н Б В.1.2-16: 2013. Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва. [Чинний від 2013-09-01]. Київ, 2013. 37 с.
4. Червинський Я. Й. та ін. Дослідження технічного стану будівель та споруд при небезпечних геологічних процесах. *Наука та будівництво*. 2014. № 2. С. 17–24.
5. Савин С. Н., Ситников И. В. Результаты динамического мониторинга конструкций большого пролета из сборного железобетона. *Будівельні конструкції*. 2011. Вип. 74, Кн. 2. С. 424–432.
6. Отрош Ю. А. Методика визначення технічного стану будівельних конструкцій виробничих будівель після пожежі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. № 160. С. 110–119.

7. Голоднов А. И. Определение остаточного ресурса железобетонных конструкций в условиях действующих предприятий. *Будівельні конструкції*. 2005. Вип. 62, Т. 2. С. 138–143.
8. Krakhmal'ny T.A., Evtushenko S.I., Krakhmal'naya M.P. Improvement of a Method of Calculation of a Residual Resource of Small. *Reinforced Concrete Bridge Constructions Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 1797–1803.
9. Клименко С. В., Дорофеев В. С. Організація робіт з моніторингу технічного стану залізобетонних конструкцій. *Дороги і мости*. Вип. 7, Т.1. С. 223–230.
10. Wu S., Clements-Croome D., Fairey V. Reliability in the Whole Life Cycle of Building Systems. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2006. Vol. 13 (2). P. 136–153.
11. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. [Чинний від 2017-04-01]. Київ, 2017. 44 с.
12. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. [Чинний від 2011-07-01]. Київ, 2011. 71 с.
13. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Москва, 1989. 88 с.
14. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. Москва, 1988. 36 с.
15. ГОСТ 27751-88. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. Москва, 1988. 6 с.
16. Mitrofanov V., Pogrebnoy V., Dovzhenko O. Strength of Concrete Elements Under Shear Action According to the Theory of Plasticity and tests. Proceeding of the 2nd fib Congress, June 5-8 2006. Naples, Italy. P. 284–285.
17. Митрофанов В. П., Довженко О. О., Погрібний В. В. Про можливість застосування передумови про ідеальну пластичність до бетону. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2002. Вип. 7. С. 118–124.
18. Довженко О. О., Погрібний В. В., Чурса Ю. В. Методика розрахунку шпонкових з'єднань залізобетонних елементів. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. 2013. № 755. Теорія і практика будівництва. С. 111–117.
19. Pohribnyi V. Dovzhenko O, Karabash L. The design of concrete elements strength under local compression based on the variational method in the plasticity theory. *Web of Conferences*. 2017. Vol. 116, 02026.
20. Dovzhenko O., Pogrebnyi V., Yurko I. The bearing capacity experimental determination of the keyed joints models in the transport construction. *Web of Conferences*. 2017. Vol. 116, 02011.
21. Sørensen J. H. Test and lower bound modeling of keyed shear connections in RC shear walls. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 155 (115).
22. Довженко О. О., Погрібний В. В., Куриленко О. О. Про можливість застосування теорії пластичності до розрахунку міцності елементів із високоміцного бетону. *Коммунальное хозяйство городов*. 2012. Вып. 105. С. 74–82.

Довженко Оксана Олександрівна, канд. техн. наук, доцент, професор кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050) 982-58-54. E-mail: o.o.dovzhenko@gmail.com.

Погрібний Володимир Володимирович, канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій та опору матеріалів Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.: (050) 982-58-53. E-mail: v.v.pogrebnoy1960@gmail.com.

Кобилецький Володимир Георгійович, начальник проектно-кошторисного відділу територіального офісу м. Кременчук АТ «Укртранснафта». Тел.: (099) 275-61-41. E-mail: vladimirgk1980@gmail.com.

Совенко Тетяна Олександрівна, студентка Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел. (096) 564-91-48. E-mail: jtanyajwinx@gmail.com.

Dovzhenko Oksana, PhD (Tech.), Associate Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures and Resistance of Materials, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel.: (050) 982-58-54. E-mail: o.o.dovzhenko@gmail.com.

Pohribnyi Volodymyr, PhD (Tech.), Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures and Resistance of Materials, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Тел.: (050) 982-58-53. E-mail: v.v.pogrebnoy1960@gmail.com.

Kobyletskyi Volodymyr, Head of project-cost estimate Department regional office. Kremenchug JSC "Ukrtransnafta". Tel.: (099) 275-61-41. E-mail: vladimirgk1980@gmail.com.

Sovenko Tetiana, Student, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel.: (096) 564-91-48. E-mail: jtanyajwinx@gmail.com.

Статтю прийнято 16.04.2019 р.

УДК 624.042

РОЗРАХУНОК ТОНКОСТІННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК НА АСИМЕТРИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ ЗА МОМЕНТНОЮ ТЕОРІЄЮ

Канд. техн. наук Н. О. Махінко

CALCULATION OF THE THIN-WALLED CYLINDRICAL SHELLS AT THE ASYMMETRIC LOAD BY USING THE GENERAL THEORY

PhD (Tech.) N. Makhinko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176130>

Розглянуто завдання визначення напружено-деформованого стану циліндричних оболонок, підсилених вертикальними ребрами жорсткості під дією несиметричного квазірівномірного навантаження відповідно до моментної теорії. Для знаходження рішення використовувалися гіпотези, які дали змогу знехтувати в рівняннях пружності крутильними та поздовжніми згинальними моментами, а також розтягом-стиском у кільцевому напрямку. Отримані рішення для різних варіантів граничних умов, які відповідають реальній роботі сталевих ємностей для зберігання. Розроблені спеціальні номограми, які дають змогу знаходити значення функцій складових напружено-деформованого стану при заданих величинах коефіцієнта реакції та безрозмірної висоти, що значно спрощує визначення цих величин.

Ключові слова: циліндрична оболонка, силосна ємність, напруження, переміщення, гармонічне навантаження, гофрована стінка.

It was considered the principles of defining the deflected mode of cylindrical shells, which are strengthened by vertical stiffeners under the influence of unsymmetrical semi-uniform load by using the general theory. Taking into account the fact that creation of the mathematically precise methods of calculation with considering the influence of a variety of factors does not bring engineering benefits, we used simplifying hypotheses to find the solution that allowed to neglect torsion and longitudinal bending moments in the equations of elasticity, as well as tension and compression in the circular direction. The rigidity of the displacement was taken as endlessly large. Calculations were conducted by the way of load factorization into the trigonometric series of the finite length. For the studied constructions of capacities such load is the wind pressure, the uneven distribution

of which is described by the function of the aerodynamic coefficient. The obtained solutions concern different variants of boundary conditions, which correspond to real work of the steel cylindrical capacity. Particularly, rigidly fixed capacities with a top free or tied absolutely rigid ring. Additionally, it was obtained efforts in a shell with one end that is clamped, and one that is reinforced by the elastic ring. For cylindrical silo capacities the presence of an elastic ring is associated with a shell of the roof and wind circles, which have a finite rigidity. It was developed special nomograms, which allow finding the value of function that compose deflected mode under the predetermined values of the coefficient of reaction and the non-dimensional height. This greatly simplifies the definition of these quantities. Mentioned analytical formula and graphic dependencies for radial, circular and longitudinal displacements and strains in the cross-sections of the shell, and also the efforts of vertical stiffeners are concise and can be applied in engineering practice. According to the proposed approach, it was given the numerical example of calculation of internal forces in the vertical stiffeners and body displacement of the four different storage capacities of different lengthening with flat and corrugated wall.

Keywords: cylindrical shells, silo, stresses, displacements, boundary conditions, corrugated wall.

Вступ. Циліндричні оболонки обертання лежать в основі багатьох реальних конструкцій, зокрема ємностей для зберігання сипких матеріалів, вивченню яких присвячені останні роботи авторів [1–3]. У цій статті сталеві оболонки з вертикальними ребрами жорсткості розглядаються саме з цього погляду, що надає певну специфіку дослідженню. Проте результуючі висновки є справедливими для використання в інших галузях міцності матеріалів і елементів конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачі розрахунку ємностей зберігання, як оболонок обертання при несиметричному навантаженні, розглядалися у роботах [4–6], проте наведений в них загальний розрахунок має доволі умовний характер щодо природи вітрових впливів та не фокусується на напружено-деформованому стані ребер жорсткості. Аналіз роботи тонкостінних циліндричних оболонок з акцентом на споруди силосних ємностей відображений також у роботах [7–9].

Визначення мети та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка аналітичного методу розрахунку циліндричних оболонок, підсиленних вертикальними ребрами жорсткості під дією несиметричного навантаження. У роботі відповідно до моментної теорії була

поставлена задача отримання простих розрахункових формул для основних складових напружено-деформованого стану: нормальних і дотичних напружень у поперечному та поздовжньому перерізі ємності, а також переміщень у радіальному напрямку.

Основна частина дослідження. Під терміном несиметричне квазірівномірне навантаження мається на увазі радіально прикладене зовнішнє навантаження, рівномірно розподілене за довжиною оболонки, проте змінне в поперечному перерізі за певним законом. Відповідно до загальної теорії оболонок добре відомо, що будь-яке навантаження можливо розкласти в тригонометричний ряд скінченної довжини [10], для якого вже наявні функціональні зв'язки між параметрами навантаження та напружено-деформованого стану. Для досліджуваних конструкцій ємностей таким навантаженням виступає вітровий тиск, який добре апроксимується рядом косинусів. Відповідно до норм проектування різних країн нерівномірний розподіл вітрового навантаження за периметром описує функція аеродинамічного коефіцієнта, що може бути подана в табличному (графічному) або аналітичному виразі.

Розрахунок будемо проводити використовуючи гіпотези, які полягають у

відсутності зсуву в серединній поверхні оболонки і нерозтяжності оболонки в кільцевому напрямку, а шукані напруження, зусилля, деформації та переміщення є функцією однієї координати x (відраховується по висоті ємності). У такому разі без великої похибки можливо знехтувати в рівняннях пружності крутильними та поздовжніми згинальними моментами, а також розтягом-стиском у кільцевому напрямку. І навпаки, вагомими залишаються деформації розтягу-стиску в поздовжньому напрямку та згину в

кільцевому. Зсув також буде набувати деякого значення, проте враховуючи, що податливість реальної конструкції ємності даному виду деформації мало впливає на розподіл зусиль, можливо прийняти жорсткість на зсув нескінченно великою. При такому обмеженні в кількість невідомих будуть входити: нормальні напруження $\sigma_{p,k}$ в поперечному перерізі ємності, дотичні $\tau_{p,k}$ – в поздовжньому та три основних переміщення – поздовжні u_k , радіальні w_k та кільцеві v_k (рис. 1).

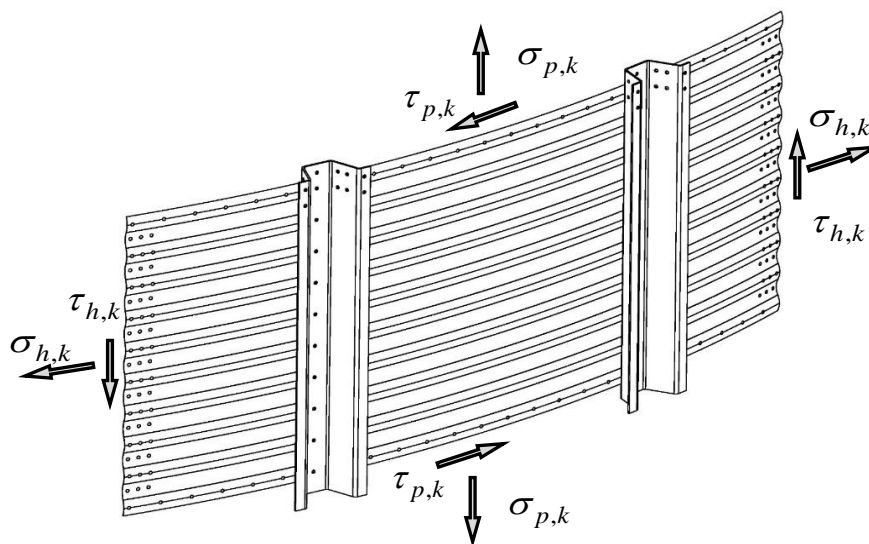


Рис. 1. Схема діючих зусиль у корпусі реальної конструкції ємності

Наслідуючи [11], будемо вважати, що всі невідомі зусилля і переміщення від навантаження $W_k = A_k \cos(k\varphi)$ можуть бути виражені через деяку невідому функцію $\xi_k(x)$, яка задовольняє лінійне диференціальне рівняння

$$\frac{d^4 \xi_k(x)}{dx^4} + 4\eta_{w,k}^4 \xi_k(x) = 4\eta_{w,k}^4 \xi_{k,0}, \quad (1)$$

де $\eta_{w,k}^4$ – величина, яка враховує характеристики жорсткості ємності в заданих

умовах k -ї гармоніки завантаження (при цьому $k \geq 2$); $\xi_{k,0}$ – величина, яка носить характер коефіцієнта пропорційності та враховує характер гармонічного завантаження $\xi_{k,0} = 0,25w_p a_k D_w^2 / (k^2 - 1)$; A_k – амплітудне значення k -ї складової; a_k – коефіцієнти розкладення аеродинамічного коефіцієнта $C_{aer}(\varphi)$ в тригонометричний ряд [1]; w_p – розрахункове значення вітрового навантаження без урахування коефіцієнта C_{aer} .

Для ємності діаметром D_w з гофрованою стінкою товщиною t_w ,

підкріпленою n_p ребрами жорсткості товщиною t_p , величина $\eta_{w,k}^4$ дорівнює

$$\eta_{w,k}^4 = \frac{16k^4(k^2-1)^2}{D_w^6} \frac{D_r}{Et_w(1+\alpha_{wp})} \frac{1}{\delta_{Dt}D_w} = \frac{1.1k\sqrt{k^2-1}}{\delta_{Dt}D_w} \left(\frac{\Delta J_w}{1+\alpha_{wp}} \right)^{1/4}, \quad (2)$$

де D_r – значення циліндричної жорсткості на згин у кільцевому напрямку; ΔJ_w – відношення моментів інерції поперечного перерізу профільованого та плоского листів стінки; E – модуль пружності.

Таким чином, величина $\eta_{w,k}^4$ визначається одним розмірним параметром – діаметром оболонки D_w та декількома безрозмірними: k – відповідає за ступінь «плавності» гармонічного навантаження за периметром ємності; ΔJ_w – ураховує підвищену згинальну жорсткість гофрованих листів; α_{wp} – показує, як співвідносяться площі поперечного перерізу ребер жорсткості та листів корпусу та $\delta_{Dt} = \sqrt{D_w/t_w}$ – коефіцієнт геометричного масштабу циліндричної оболонки.

У розрахунках величина $\eta_{w,k}^4$ використовується як один з множників у добутку $x\eta_{w,k}$. Тому доцільно ввести коефіцієнт реакції $\lambda_{\eta,k}$, як функцію безрозмірної висоти $y = x/H_w$

$$x\eta_{w,k} = yH_w\eta_{w,k} = y\lambda_{\eta,k}, \quad (3)$$

$$\lambda_{\eta,k} = 1.1k\sqrt{k^2-1}\Delta_w/\delta_{Dt} \left(\Delta J_w/(1+\alpha_{wp}) \right)^{1/4}, \quad (4)$$

де H_w – висота ємності;

$$\Delta_w = H_w/D_w - \text{відносне видовження.}$$

Розв’язання рівняння (1) матиме вигляд [1]

$$\xi_k(y) = e^{-y\lambda_{\eta,k}} \left[C_{1,k} \sin(y\lambda_{\eta,k}) + C_{2,k} \cos(y\lambda_{\eta,k}) \right] + e^{y\lambda_{\eta,k}} \left[C_{3,k} \sin(y\lambda_{\eta,k}) + C_{4,k} \cos(y\lambda_{\eta,k}) \right] + \xi_{k,0}. \quad (5)$$

Сталі інтегрування знаходимо скориставшись граничними умовами функції $\xi_k(y)$ у двох випадках. У першому варіанті розглянемо оболонку з жорстким зацмленням та вільним верхнім краєм; у другому – верхній кінець будемо вважати зв’язаним абсолютно жорстким кільцем. У термінах кінцево-елементного аналізу це відповідає процедурі об’єднання радіальних та кільцевих переміщень для всіх верхніх точок корпусу оболонки. Такий підхід має практичну користь, оскільки

дасть змогу додатково отримати зусилля в оболонці з одним затисненим, а другим підкріпленим пружним кільцем краями. Для реальних конструкцій ємностей наявність пружного кільця пов’язується з обичайкою даху та вітровими кільцями, які мають скінчену жорсткість. Якщо позначити через N_{el} зусилля в ємності з пружним кільцем, а N_{rig} і N_{fr} відповідно з жорстким кільцем і вільним краєм, отримаємо таке співвідношення:

$$N_{el} = N_{fr} - (N_{fr} - N_{rig})k_{el}, \quad (6)$$

$$k_{el} = w_{fr} / (w_{el} + w_{fr}), \quad (7)$$

де k_{el} – коефіцієнт пружної податливості верху ємності;

w_{fr} – максимальні радіальні переміщення вільного краю;

w_{el} – максимальні радіальні переміщення пружного кільця від сил взаємодії ємності та абсолютно жорсткого кільця.

Для обох варіантів необхідно забезпечити виконання умови тотожності нулю таких параметрів реакцій:

$$\xi_k(y)|_{y=1} = 0; \quad \left. \frac{d\xi_k(y)}{dy} \right|_{y=1} = 0; \quad \left. \frac{d^2\xi_k(y)}{dy^2} \right|_{y=0} = 0; \quad \left. \frac{d^3\xi_k(y)}{dy^3} \right|_{y=0} = 0, \quad (8)$$

$$\xi_k(y)|_{y=1} = 0; \quad \left. \frac{d\xi_k(y)}{dy} \right|_{y=1} = 0; \quad \left. \frac{d^2\xi_k(y)}{dy^2} \right|_{y=0} = 0; \quad \xi_k(y)|_{y=0} = 0. \quad (9)$$

Якщо початок координат розміщений угорі ємності, перше співвідношення формули (8) відповідає рівності нулю поперечних згинальних моментів, друге – поздовжніх переміщень, третє – поздовжніх нормальних напружень, четверте – дотичних напружень. Остання рівність

формули (9) передбачає відсутність зміщення будь-якої точки верхнього краю в радіальному або кільцевому напрямку ємності.

Підставивши граничні умови (8) у диференціальне рівняння (5) для сталих інтегрування, отримаємо

$$C_{1,k} = C_{3,k} = -M_{1,k}\xi_{k,0}, \quad C_{2,k} = -M_{2,k}\xi_{k,0}, \quad C_{4,k} = -M_{3,k}\xi_{k,0}, \quad (10)$$

де $M_{1,k}$, $M_{2,k}$ і $M_{3,k}$ – безрозмірні функції реакції ємності.

$$M_{1,k} = [\text{chs } \lambda_{\eta,k} - \text{shc } \lambda_{\eta,k}] / [\cosh^2 \lambda_{\eta,k} + \cos^2 \lambda_{\eta,k}], \quad (11)$$

$$M_{2,k} = \frac{3\exp \lambda_{\eta,k} \cos \lambda_{\eta,k} + \exp(-\lambda_{\eta,k}) \cos \lambda_{\eta,k} - 2\text{chs } \lambda_{\eta,k}}{4(\cosh^2 \lambda_{\eta,k} + \cos^2 \lambda_{\eta,k})}, \quad (12)$$

$$M_{3,k} = \frac{\exp \lambda_{\eta,k} \cos \lambda_{\eta,k} + 3\exp(-\lambda_{\eta,k}) \cos \lambda_{\eta,k} + 2\text{chs } \lambda_{\eta,k}}{4(\cosh^2 \lambda_{\eta,k} + \cos^2 \lambda_{\eta,k})}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{chs}(y\lambda_{\eta,k}) &= \cosh(y\lambda_{\eta,k}) \sin(y\lambda_{\eta,k}), & \text{chc}(y\lambda_{\eta,k}) &= \cosh(y\lambda_{\eta,k}) \cos(y\lambda_{\eta,k}), \\ \text{shs}(y\lambda_{\eta,k}) &= \sinh(y\lambda_{\eta,k}) \sin(y\lambda_{\eta,k}), & \text{shc}(y\lambda_{\eta,k}) &= \sinh(y\lambda_{\eta,k}) \cos(y\lambda_{\eta,k}). \end{aligned} \quad (14)$$

Підставивши (11)–(13) в (5) та застосувавши гіперболічні функції, для шуканої функції $\xi_k(y)$ отримуємо

$$\xi_k(y) = \xi_{k,0}[1 - \psi_{m,k}(y)], \quad (15)$$

$$\psi_{m,k}(y) = M_{1,k} \operatorname{ch}(y\lambda_{\eta,k}) + \cos(y\lambda_{\eta,k}) \left[M_{2,k} \exp(-y\lambda_{\eta,k}) + M_{3,k} \exp(y\lambda_{\eta,k}) \right]. \quad (16)$$

Решту складових напружено-деформованого стану: переміщення радіальні $w_k(y, \varphi)$, кільцеві $v_k(y, \varphi)$ та поздовжні $u_k(y, \varphi)$; напруження в поперечних перерізах $\sigma_{p,k}(y, \varphi)$ та $\tau_{p,k}(y, \varphi)$

знаходимо за допомогою загальних формул теорії оболонок. Результуючі формули наводяться з урахуванням похідних функції $\xi_k(y)$ та визначення зведеної циліндричної жорсткості D_r

$$w_k(y, \varphi) = 2D_w A_w \frac{[1 - \psi_{m,k}(y)]}{(k^2 - 1)^2} a_k \cos(k\varphi), \quad (17)$$

$$v_k(y, \varphi) = 2D_w A_w \frac{[1 - \psi_{m,k}(y)]}{k(k^2 - 1)^2} a_k \sin(k\varphi), \quad (18)$$

$$u_k(y, \varphi) = \frac{D_w}{A_w} A_w \frac{\psi_{u,k}(y)}{k^2(k^2 - 1)^2} \lambda_{\mu,k} a_k \cos(k\varphi), \quad (19)$$

$$\sigma_{p,k}(y, \varphi) = \frac{E}{A_w^2} A_w \frac{\psi_{\sigma,k}(y)}{k^2(k^2 - 1)^2} \lambda_{\eta,k}^2 a_k \cos(k\varphi), \quad (20)$$

$$\tau_{p,k}(y, \varphi) = \frac{E}{A_w^3} A_w \frac{\psi_{\tau,k}(y)}{k^3(k^2 - 1)^2} \lambda_{\eta,k}^3 a_k \sin(k\varphi), \quad (21)$$

де A_w – коефіцієнт податливості ємності

$$A_w = 3\delta_{Dt}^6 (1 - \mu^2) w_p / [8\Delta J_w E], \quad (22)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона.

Функції $\psi_{u,k}(y)$, $\psi_{\sigma,k}(y)$ і $\psi_{\tau,k}(y)$ аналогічні з математичного погляду $\psi_{m,k}(y)$ та визначаються виразами перших трьох похідних. Для варіанта оболонки, у якої верхній край вільний:

$$\begin{aligned} \psi_{u,k}(y) = & M_{1,k} \left[\operatorname{chc}(y\lambda_{\eta,k}) + \operatorname{shs}(y\lambda_{\eta,k}) \right] + \\ & + \cos(y\lambda_{\eta,k}) \left[M_{3,k} \exp(y\lambda_{\eta,k}) - M_{2,k} \exp(-y\lambda_{\eta,k}) \right] - \\ & - \sin(y\lambda_{\eta,k}) \left[M_{3,k} \exp(y\lambda_{\eta,k}) + M_{2,k} \exp(-y\lambda_{\eta,k}) \right], \end{aligned} \quad (23)$$

$$\psi_{\sigma,k}(y) = 2M_{1,k} \operatorname{shc}(y\lambda_{\eta,k}) + 2\sin(y\lambda_{\eta,k}) \times \\ \times [M_{2,k} \exp(-y\lambda_{\eta,k}) - M_{3,k} \exp(y\lambda_{\eta,k})], \quad (24)$$

$$\psi_{\tau,k}(y, \varphi) = M_{1,k} [\operatorname{shs}(y\lambda_{\eta,k}) - \operatorname{chc}(y\lambda_{\eta,k})] - \\ - M_{2,k} \exp(-y\lambda_{\eta,k}) [\cos(y\lambda_{\eta,k}) - \sin(y\lambda_{\eta,k})] + \\ + M_{3,k} \exp(y\lambda_{\eta,k}) [\cos(y\lambda_{\eta,k}) + \sin(y\lambda_{\eta,k})]. \quad (25)$$

Для варіанта оболонки, верхнім кінцем зв'язаної з абсолютно жорстким кільцем:

$$\psi_{m,k}(y) = 2M_{2,k} \operatorname{shc}(y\lambda_{\eta,k}) - 2M_{1,k} \operatorname{chs}(y\lambda_{\eta,k}) + \exp(y\lambda_{\eta,k}) \cos(y\lambda_{\eta,k}), \quad (26)$$

$$\psi_{u,k}(y) = \exp(y\lambda_{\eta,k}) \sin(y\lambda_{\eta,k}) - \exp(y\lambda_{\eta,k}) \cos(y\lambda_{\eta,k}) + \\ + 2M_{1,k} [\operatorname{shs}(y\lambda_{\eta,k}) + \operatorname{chc}(y\lambda_{\eta,k})] + 2M_{2,k} [\operatorname{shs}(y\lambda_{\eta,k}) - \operatorname{chc}(y\lambda_{\eta,k})], \quad (27)$$

$$\psi_{\sigma,k}(y) = 2\exp(y\lambda_{\eta,k}) \sin(y\lambda_{\eta,k}) + 4M_{1,k} \operatorname{shc}(y\lambda_{\eta,k}) + 4M_{2,k} \operatorname{chs}(y\lambda_{\eta,k}), \quad (28)$$

$$\psi_{\tau,k}(y, \varphi) = 2M_{1,k} [\operatorname{chc}(y\lambda_{\eta,k}) - \operatorname{shs}(y\lambda_{\eta,k})] + \\ + M_{2,k} [\operatorname{chc}(y\lambda_{\eta,k}) + \operatorname{shs}(y\lambda_{\eta,k})] + \\ + \exp(y\lambda_{\eta,k}) [\cos(y\lambda_{\eta,k}) + \sin(y\lambda_{\eta,k})]. \quad (29)$$

Для сталих $M_{1,k}$ і $M_{2,k}$ маємо такі вирази:

$$M_{1,k} = 2(\operatorname{chc} \lambda_{\eta,k} - \operatorname{shs} \lambda_{\eta,k} - \cos^2 \lambda_{\eta,k}) / M_{0,k}, \quad (30)$$

$$M_{2,k} = \frac{2\operatorname{ch} \lambda_{\eta,k} (\cos \lambda_{\eta,k} - \exp \lambda_{\eta,k}) + 2\operatorname{shs} \lambda_{\eta,k} + \exp \lambda_{\eta,k} \sin(2\lambda_{\eta,k}) (\operatorname{ch} \lambda_{\eta,k} - \operatorname{sh} \lambda_{\eta,k})}{M_{0,k}}, \quad (31)$$

$$M_{0,k} = \operatorname{sh}(2\lambda_{\eta,k}) - \sin(2\lambda_{\eta,k}) + 2\operatorname{ch} \lambda_{\eta,k} \operatorname{sh} \lambda_{\eta,k} - \operatorname{shc}(2\lambda_{\eta,k}) - \operatorname{chs}(2\lambda_{\eta,k}) + \\ + 2\operatorname{sh} \lambda_{\eta,k} [\operatorname{sh} \lambda_{\eta,k} \sin(2\lambda_{\eta,k}) + \operatorname{ch} \lambda_{\eta,k} \cos(2\lambda_{\eta,k})]. \quad (32)$$

Певно, що найбільшими труднощами при описі напружено-деформованого стану елемента є обчислення значень функцій $\psi_{m,k}(y)$, $\psi_{u,k}(y)$, $\psi_{\sigma,k}(y)$ і $\psi_{\tau,k}(y)$ при заданому аргументі. І хоча отримані залежності більш лаконічні, ніж при використанні відомих функцій Крилова [9],

застосовувати їх в інженерній практиці досить незручно. Ураховуючи це, були розроблені спеціальні номограми, які дають змогу знаходити значення наведених функцій при заданих величинах $\lambda_{\eta,k}$ і y (рис. 2, 3).

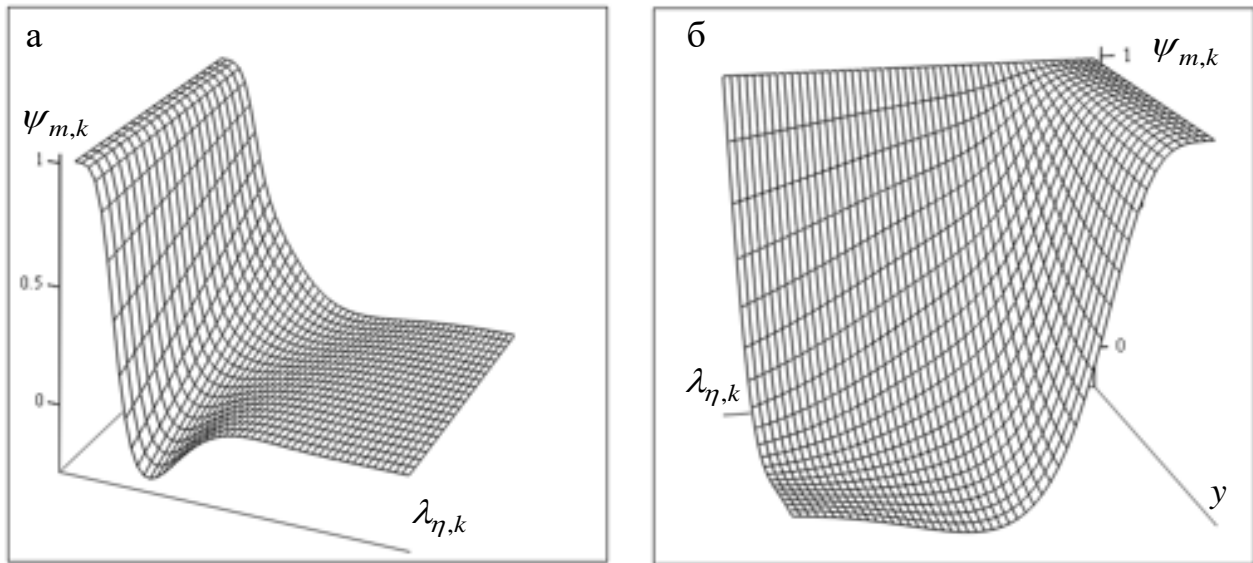


Рис. 2. Ізометричне подання функції $\psi_{m,k}(y)$ для ємностей з вільним кінцем (а) та абсолютно жорстким кільцем (б)

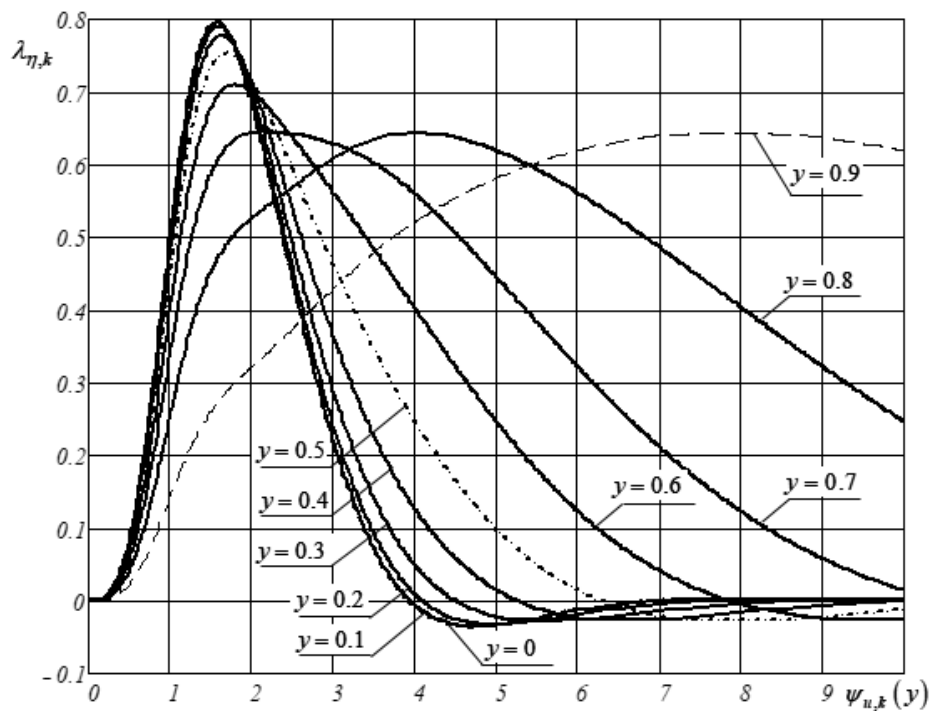


Рис. 3. Номограма функції $\psi_{u,k}(y)$ для ємностей з вільним кінцем

Важливо також зазначити, що напруження зсуву $\tau_{p,k}(y, \varphi)$ набагато менші за нормальні $\sigma_{p,k}(y, \varphi)$, тому в інженерних розрахунках ними можливо нехтувати,

ураховуючи лише біля основи ємності або в місці спряження з верхнім кільцем.

Зусилля у вертикальних ребрах жорсткості знайдемо з умови їх роботи на розтяг-стиск. Поздовжніми згинальними та

крутильними моментами нехтуємо, тим самим приймаючи, що поздовжні нормальні напруження $\sigma_{p,k}(y, \varphi)$ за площею поперечного перерізу ребер розподіляються рівномірно. Окрім цього враховуємо, що всі вертикальні зусилля на основу ємності передаються виключно ребрами. Врешті для поздовжнього зусилля маємо

$$N_{p,k}(y, \varphi) = \sigma_{p,k}(y, \varphi) A_p (1 + 1/2\alpha_{wp}). \quad (33)$$

Відповідно до отриманої формульної процедури були проведені практичні обчислення для чотирьох ємностей різного видовження Δ_w з плоскою та гофрованою стінкою, результати яких зведені у таблицю.

Таблиця 1

Процедура розрахунку переміщень корпусу ємності та зусиль у вертикальних ребрах жорсткості за моментною теорією

Параметр	Значення параметра для циліндричної ємності											
	№ 1			№ 2			№ 3			№ 4		
Вихідні дані розрахунку												
H_w , м	30			30			30			30		
D_w , м	30			10			30			10		
Δ_w	1			3			1			3		
стінка	плоский						гофрований					
t_w , мм	2			6			2			6		
t_p , мм	6			2			6			2		
n_p	90			60			90			60		
Хід виконання розрахунку												
ΔJ_w	1,0			1,0			71,9			8,0		
A_p , см ²	26,88			17,92			26,88			17,92		
α_{wp}	1,284			0,285			1,284			0,285		
δ_{Dt}	122,47			40,825			122,47			40,825		
A_w	5591			7,67			77,8			0,96		
k	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
λ_η	0,025	0,113	0,26	0,263	1,176	2,7	0,074	0,33	0,755	0,442	1,98	4,53
$M_{1,k} \cdot 10^3$	5,4E-3	0,483	5,81	6,05	325,8	175,5	0,133	11,9	129,3	28,44	349	-17,3
$M_{2,k} \cdot 10^3$	500	500	496	496	44	-207,4	500	491	362	476	-281	4,75
$M_{3,k} \cdot 10^3$	500	500	502	502	370	-31,7	500	503	491	505	68,3	-12,6
$\psi_{m,k}$	1,0	1,0	0,998	0,998	0,414	-0,24	1,0	0,994	0,853	0,981	-0,212	7,8E-3
$\psi_{u,k} \cdot 10^3$	0,011	0,97	11,61	12,1	652	351,5	0,267	23,8	258,6	57	698	-35
$\psi_{\sigma,k} \cdot 10^3$	-1,281	-25,6	-134,4	-138,1	-1821	-1942	-10,86	-216,5	-1044	-387	-1954	-2000
Результати розрахунку												
w_k , мм	7,65	122,4	618,5	40,7	400	155	7,65	122,0	560	40,3	104	15,8
$v_{k,max}$, мм	3,83	30,6	103,1	20,4	100	26	3,83	30,5	93,3	20	26	2,7
u_k , мм	1,28	5,1	11,5	2,3	5,5	0,55	1,28	5,1	10,3	2,3	1,3	0
$\sigma_{p,k}$, кН/см ²	2,63	10,5	23,6	4,66	12,3	5,6	2,63	10,5	21,6	4,6	4,7	2,05
$N_{p,k}$, кН	98	392	882	115	303	139	98	391	808	114	115	50,5

Примітки:

1. Параметри гофрування листа: ширина горизонтальної проекції $L_w = 128$ мм, висота хвилі $h_w = 7$ мм.

2. Геометрія ребра: висота $h_p = 120$ мм; поперечні розміри – $a_p = 112$ мм; $\ell_p = 280$ мм; нахил бокових граней $\beta_p = 110^\circ$; A_p – площа поперечного перерізу ребра.

3. Навантаження $w_p = 1,0$ кПа при коефіцієнті $a_k = 1$.

4. Переміщення обчислені для верху ємності, напруження в ребрах – біля основи, $\varphi = 0$.

Висновки:

1. Розв'язана задача пошуку функції для визначення зусиль і переміщень корпусу циліндричної ємності при дії квазі-рівномірного навантаження. Прототипом цього реального об'єкта виступила тонка

циліндрична оболонка, а розрахунок проводився відповідно до моментної теорії.

2. Отримані аналітичні формульні та графічні залежності для всіх складових напружено-деформованого стану (радіальних, кільцевих і поздовжніх переміщень та напружень).

3. Розроблені спеціальні номограми, які дають змогу знаходити значення функцій складових напружено-деформованого стану за заданими величинами коефіцієнта реакції та безрозмірної висоти.

4. Здійснені числові розрахунки (табличний вигляд) переміщень корпусу вертикальної циліндричної сталеві ємності та внутрішніх зусиль у вертикальних ребрах жорсткості ємності за монетною теорією. Дані таблиці ілюструють поетапний хід розв'язання задачі за отриманою формульною процедурою.

Список використаних джерел

1. Pichugin S. F., Makhinko N. O. Features of the Silo Capacities' Calculation at the Unsymmetrical Wind Load. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, № 4.8. P. 22–26. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27208> (last access: 05.04.2019).
2. Makhinko N. Stress-strain state of the storage silos under the action of the asymmetric load. *Matec Web of Conference*. 2018. Vol. 230. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002018> (last access: 05.04.2019).
3. Lapenko O., Makhinko A., Makhinko N. Features of silos calculations at asymmetric wind load by using momentless theory. *Tekhniki glasnik*. 2019. Vol. 13, № 1. P. 12–15. URL: <https://doi.org/10.31803/tg-20180522160526> (last access: 05.04.2019).
4. Кан С.Н. Строительная механика оболочек. Москва: Машиностроение, 1966. 508 с.
5. Иммерман А. Г. Расчет ортотропной круговой цилиндрической оболочки на поперечную нагрузку. *Расчет пространственных конструкций: сборник статей*. 1955. Вып. III. С. 323–373.
6. Сегаль А. И. Практические методы расчета тонкостенных конических оболочек. *Расчет пространственных конструкций: сборник статей*. 1951. Вып. II. С. 383–412.
7. Rotter J. M., Sadowski A. J. Cylindrical shell bending theory for orthotropic shells under general axisymmetric pressure distributions. *Engineering Structures*. 2012. № 42. P. 258–265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.024> (last access: 05.04.2019).
8. Teng J.G., Rotter J.M. Buckling of Thin Metal Shells. London : *Spon Press*, 2004. 520 p.
9. Chen L., Rotter J. M. Buckling of anchored cylindrical shells of uniform thickness under wind load. *Engineering Structures*. 2012. № 41. P. 199–208. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.046> (last access: 05.04.2019).

10. Гольденвейзер А. Л. Теория упругих тонких оболочек. Москва: Наука, 1976. 512 с.

11. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений / под ред. А.А. Уманского. Москва: Издательство литературы по строительству, 1973. 416 с.

Махінко Наталія Олександрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій будівництва Національного авіаційного університету. Тел. +38(050)304-50-72. E-mail: pasargada1985@gmail.com.

Makhinko Nataliia, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Computer Technology Building, National Aviation University. Tel. +38(050)304-50-72. E-mail: pasargada1985@gmail.com.

Статтю прийнято 16.04.2019 р.

УДК 528

ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ ПРИВ'ЯЗКИ ПРИРОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Д-р техн. наук Є. Б. Угненко, кандидати техн. наук О. М. Ужвієва, О. М. Тимченко, С. М. Камчатна

ENGINEERING GEODESIC PROVISION OF SPATIAL CONNECTION OF NATURAL OBJECTS

D. Sc. (Tech.) E. Ugnenko, PhD (Tech.) E. Uzhvieva (Uzhviieva), PhD (Tech.) O. Tymchenko, PhD (Tech.), PhD (Tech.) S. Kamchatna

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176139>

У статті розглянуто питання регулювання земельних відносин. Зазначено, що інженерно-геодезичні вишукування забезпечують просторову прив'язку природних об'єктів та їх елементів. Розрядні геодезичні мережі згущення створюють методами полігонометрії, триангуляції та поєднанням цих методів із використанням супутникових навігаційних систем GPS. Геодезичні роботи передбачають у подальшому: проектування, перенесення проектів на місцевість та відведення ділянок у користування чи власність.

Ключові слова: *земельні відносини, інженерні вишукування, просторова прив'язка природних об'єктів, перенесення проектів на місцевість, геодезичні роботи.*

In the article the question of regulation of land relations is considered. It is noted that engineering geodesic investigations provide spatial connection of natural objects and their elements.

One of the types of engineering and geodetic works is the removal of in-kind and fixing on the area of coastal strips along the reservoirs, which are carried out in order to create a favorable regime for water objects, preventing their pollution.

State geodesic network-geodesic basis topographic units of all scale. Which unites in a single whole planned and high-altitude geodetic networks, created in accordance with the requirements of "On approving the procedure for using the state geodetic reference System of coordinates USK-2000 in carrying out work with land management». Bit geodesic networks of thickening are the

basis of topographic determinations in scale and engineering works. These works are carried out in the territories of settlements in land planning, land reclamation, land cadaster, use of water resources, etc. Bit geodetic network of thickening creates methods of polygonometry, triangulation and combination of these methods with the use of satellite navigation systems GPS.

The method of marking works is chosen depending on the required accuracy of marking the point, the availability of geodetic instruments, the conditions of the area, qualification of the personnel, etc. In this case, the method of direct marking and the method of editing are distinguished. The first method consists in the direct construction of marking sizes with the given accuracy. The second method is based on the preliminary marking of the point, close to the design one, with its subsequent displacement to the design position. The method of direct marking is used, as a rule, in works of less accuracy, and the method of editing - in works that require high accuracy of marking (bridges, dams, etc.)

The use of modern devices and technologies (GPS receivers, electronic total stations) allow to carry out geodetic work with greater accuracy and efficiency and convert the geodetic work to the level of new technologies.

Keywords: *land relations, engineering investigations, spatial connection of natural objects, transfer of projects to the locality, geodetic works.*

Вступ. Важливою проблемою сучасності є дотримання балансу у споживанні, збереженні та раціональному використанні природних ресурсів. Вихідні дані і матеріали для регулювання земельних відносин одержують у результаті проведення інженерних вишукувань, зокрема інженерно-геодезичних, що забезпечують просторову прив'язку природних об'єктів та їх елементів, визначають геометричні і фізичні параметри, якісні і кількісні характеристики [1].

Геодезичні роботи передбачають проектування, перенесення проектів на місцевість та відведення ділянок у користування чи власність і роботи, пов'язані з використанням певного виду ресурсів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Водні ресурси не є винятком і потребують захисту та раціонального використання. Упродовж останніх років екологічна ситуація, що склалася на більшості водних об'єктів, пов'язана з недосконалістю проведених водоохоронних заходів. Зокрема необхідним є прийняття ряду заходів та законів, які б могли запобігти або зменшити негативний вплив на водні об'єкти. Одним з таких заходів є винесення в природу і закріплення на

місцевості прибережних смуг уздовж водойм межовими знаками, які розробляються з метою створення сприятливого режиму для водних об'єктів, запобігання їхньому забрудненню [2].

Правове регулювання земельних відносин в Україні здійснюється з урахуванням законодавчої бази та нормативних документів, насамперед Конституцією України [3] як Основним Законом країни, Земельним кодексом України [4], Законом України «Про землеустрій» [5] та іншими нормативно-правовими актами, прийнятими відповідно до Конституції та Земельного кодексу України.

Основна частина дослідження. Межі прибережних захисних смуг закріплюються у природі (на місцевості) [7] геодезичними знаками на відстані видимості один від одного. Цей захід значно зменшив би негативний вплив на водні об'єкти. Однак їх закріплення на місцевості здійснюється дуже повільно.

Проектно-технічна документація щодо встановлення прибережних смуг у більшості областей України на цей час розроблена тільки частково [4, 6, 7].

Водний об'єкт надається у користування за рахунок земель запасу, розташованих за межами населених пунктів.

Складання договору оренди про передачу земельної ділянки проводиться після перенесення в натуру (на місцевість) меж земельної ділянки та закріплення їх межовими знаками [7–9].

Геодезичною основою великомасштабних топографічних знімачь служать пункти державної геодезичної мережі, геодезичних мереж згущення 1-го і 2-го розрядів, знімальних геодезичних мереж.

Державна геодезична мережа – геодезична основа топографічних знімачь усіх масштабів, що об'єднує в єдине ціле планову і висотну геодезичні мережі, створені відповідно до вимог «Про затвердження Порядку використання Державної геодезичної референційної системи координат УСК-2000 при здійсненні робіт із землеустрою» [10]. Розрядні геодезичні мережі згущення є основою топографічних знімачь у масштабах та інженерних робіт, які виконують на територіях населених пунктів у землевпорядкуванні, меліорації земель, земельному кадастрі, лісовпорядкуванні, використанні водних ресурсів тощо [8].

Розрядні геодезичні мережі згущення створюють методами полігонометрії, триангуляції та поєднанням цих методів із використанням супутникових навігаційних систем GPS [10]. Розмічувальні геодезичні роботи полягають у зазначенні на місцевості головних геометричних елементів проекту, характерних точок і ліній. Розмічування меж земельної ділянки виконується з пунктів геодезичної основи, створеної при зніманні місцевості [8, 10].

Спосіб розмічувальних робіт обирається залежно від необхідної точності розмічування точки, наявності геодезичних приладів, умов місцевості, кваліфікації персоналу тощо. При цьому розрізняють метод безпосереднього розмічування, що полягає в безпосередній побудові розмічувальних величин із заданою точністю і метод редукування, оснований на попередньому розмічуванні точки, близької до проектної, з подальшим її зміщенням у

проектне положення. Метод безпосереднього розмічування застосовують, як правило, на роботах меншої точності, а метод редукування – на роботах, що вимагають високої точності розмічування [11, 12].

Встановлення меж земельної ділянки в натурі (на місцевості) здійснюється на основі технічної документації із землеустрою, якою визначається місцезнаходження поворотних точок меж земельної ділянки в натурі (на місцевості) [7]. Геодезичні роботи виконуються на підставі Закону України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» [13] та «Інструкції з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500» [8].

За матеріалами натурних спостережень визначено три пункти триангуляції (рис. 1) 3-го класу для забезпечення висотами топографічних знімачь і рішення інженерних задач, які є вихідними пунктами для методу GPS-спостереження [10].

При визначенні координат геодезичних пунктів застосовано статичний метод GPS-знімання [10], який полягає у послідовному спостереженні суміжних пунктів.

GPS-мережа відповідає основним вимогам:

- мережа складена із замкнутих геометричних фігур;
- прив'язка мережі здійснена до найближчих пунктів державної геодезичної мережі, на яких виконано GPS-спостереження [10].

Попередній розрахунок точності та врівноваження GPS-мережі виконано в програмі «Digitals» [14] по врівноваженню геодезичних планово-висотних та лінійно-кутових мереж, що надають найвищу точність (таблиця).

Точки повороту межі земельної ділянки, які не увійшли до теодолітного ходу, були винесені на місцевість способом полярних координат з елементами редукування [11, 12].

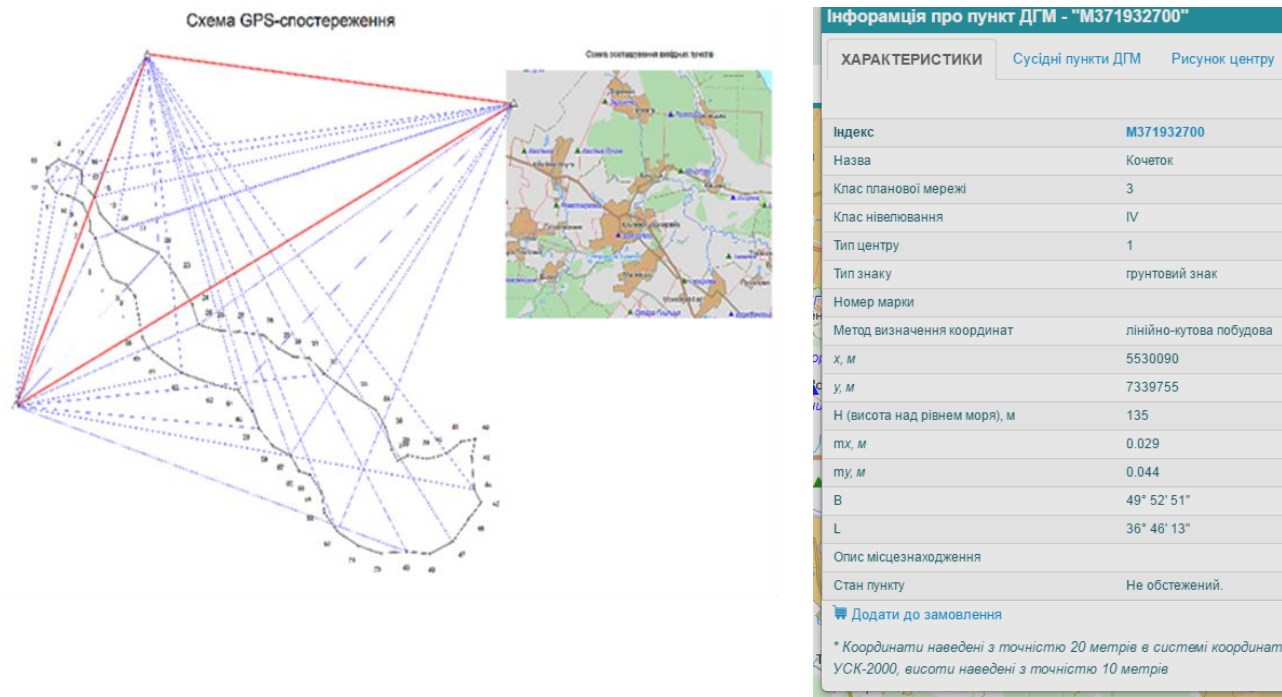


Рис. 1. Схема GPS-спостережень та вихідний пункт

Таблиця
Відомість координат розташування земельної ділянки

№ зп	X	Y	Довжина	Кут	Внутрішній
1	5 527 995,16	7 331 262,52	38,51	349°22'33"	179°54'34"
2	5 528 033,01	7 331 255,42	29,38	319°54'53"	209°27'39"
3	5 528 055,49	7 331 236,50	32,54	289°05'11"	210°49'41"
4	5 528 066,13	7 331 205,75	32,47	326°53'15"	142°11'56"
...
7	5 528 161,94	7 331 159,62	20,1	359°59'30"	142°26'00"
...
66	5 527 951,40	7 331 270,80	44,54	349°17'08"	159°17'10"
			2 743,25		11520°00'00"

Метод редукування полягає в попередньому розмічуванні точки, близької до проектної, з подальшим її зміщенням у проектне положення.

Головні етапи методу включають:

- попереднє розмічування наближеної точки;
- точне визначення елементів розмічування для наближеної точки;
- порівняння їх з проектними величинами та визначення редукацій;

- зміщення наближеної точки в проектне положення на основі обчислених величин редукацій.

Використовуючи полярний спосіб з елементами редукування, додатково розраховуються коефіцієнти для обчислення елементів редукування (K_x , K_y), за одержаними розмічувальними елементами β і d таблиці за формулою [11,12]

$$K_y = \frac{d_{\text{пр}}}{\rho}, \quad (1)$$

де K_y – коефіцієнт для обчислення елементів редукування по осі y ;

$d_{\text{пр}}$ – проектна довжина;

ρ – радіан;

$K_x = 1$ – коефіцієнт для обчислення елементів редукування по осі x .

Значення редукацій зручно представляти прямокутними або полярними координатами та прив'язувати їх до одного з напрямів візування з опорного пункту, що приймається як умовна вісь абсцис (рис. 2).

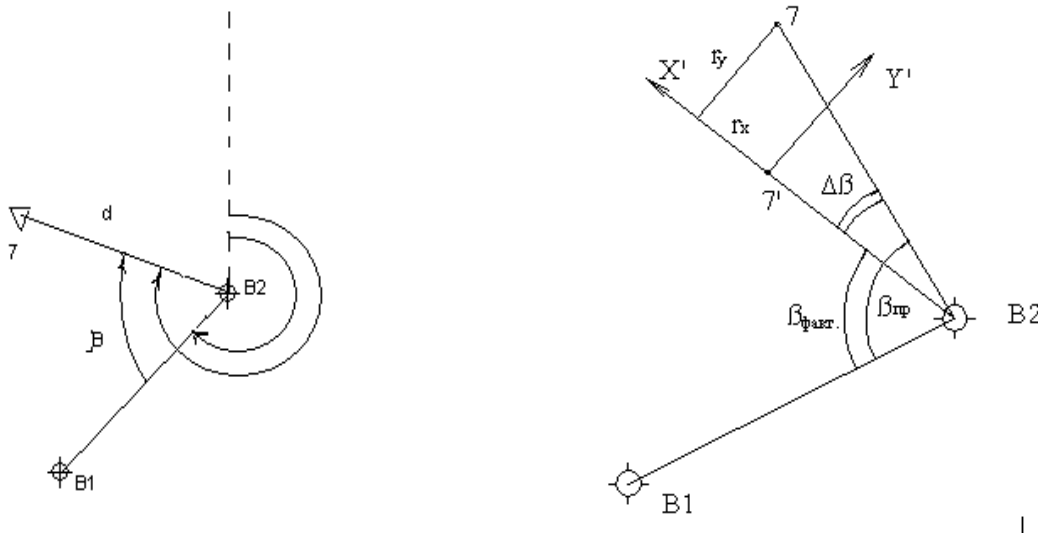


Рис. 2. Винесення в натуру точки способом полярних координат та методом редукування точки

Напрямок зміщення наближеної точки в проектне положення визначається знаком прямокутної редукації r_x та r_y . За ними визначають кутові та лінійні елементи загальної редукації, прив'язаної до умовної осі абсцис, за формулами [11, 12]:

$$r_x = \Delta d \cdot K_x, \quad (2)$$

$$r_y = \frac{\Delta \beta \cdot d_{\text{пр}}}{\rho}, \quad (3)$$

де r_x та r_y – прямокутні редукації;

Δd – лінійні елементи загальної редукації;

$\Delta \beta$ – кутові елементи загальної редукації;

ρ – радіан.

Установлення меж земельної ділянки в натурі (на місцевості) здійснено на основі технічної документації із землеустрою, яка визначає місцезнаходження поворотних точок меж земельної ділянки в натурі (на місцевості). Межові знаки встановлюються у точках повороту меж земельної ділянки, але не рідше ніж через 200 м.

Геодезичні роботи проводяться на підставі закону України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» [13] та «Інструкції з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500» [8].

Програмний комплекс «Digitals» дає змогу обробки геодезичних вимірів, побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР) [14, 15], складання топографічних карт і планів, підготовки кадастрових планів,

каталогів координат і інших графічних і текстових земельпоряджувальних документів [9].

Висновки. Перенесення проекту в натуру полягає в точному положенні на місцевості проектних меж землеволодінь і землекористувань та закріплення їх межовими знаками.

Межі земельної ділянки в натурі (на місцевості) закріплюються межовими знаками, які передаються на зберігання

користувачу земельної ділянки, про що складається відповідний акт. При цьому користувач земельної ділянки попереджається про відповідальність за порушення чи знищення вказаних знаків [7].

Використання сучасних приладів та технологій (GPS-приймачів, електронних тахеометрів) дають змогу проводити геодезичні роботи з більшою точністю та оперативністю й переводять геодезичні роботи на рівень новітніх технологій.

Список використаних джерел

1. Волосецький Б. І. Геодезія у природокористуванні: навч. посібник. Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008. 288 с.
2. Третяк А. М. Управління земельними ресурсами: навч. посібник / за ред. проф. А. М. Третяка. Вінниця: Нова Книга, 2006. 360 с.
3. Конституція України: Закон України від 28.06.1996 № 254 к/96-ВР // База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: http://www.vru.gov.ua/legislative_acts/1.
4. Земельний кодекс України. Документ 2768-III, чинний, поточна редакція – Редакція від 07.02.2019, підстава - 2666-VIII. *Відомості Верховної Ради України* (ВВР). 2002. № 3-4. Ст. 27. URL: <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2768-14/page3>.
5. Про землеустрій: Закон України) Документ 858-IV, чинний, поточна редакція – Редакція від 01.01.2019, підстава - 2498-VII І. *Відомості Верховної Ради України* (ВВР). 2003. № 36. Ст. 282. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15>.
6. Водний кодекс України. Введений в дію Постановою ВР № 214/95-ВР від 06.06.95. Документ 213/95-ВР, чинний, поточна редакція — редакція від 18.12.2017, підстава 2059-19. *Відомості Верховної Ради* (ВВР). 1995. № 24. Ст. 189. URL: <https://zakon.help/law/213/95-%D0%92%D0%A0/>.
7. Про затвердження Інструкції про встановлення (відновлення) меж земельних ділянок в натурі (на місцевості) та їх закріплення межовими знаками: наказу Держкомзему від 16 червня 2010 р. за № 391/17686. URL: <http://consultant.parus.ua/?doc=08NS852DE5>.
8. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. Документ z0393-98, поточна редакція – редакція від 28.09.1999, підстава - z0653-99. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0393-98>.
9. Про затвердження форм адміністративної звітності з кількісного обліку земель (форми № 11-зем, 12-зем, 15-зем, 16-зем) та Інструкцій щодо їх заповнення. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0133-16/card3#Files>.
10. Про затвердження Порядку використання Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 при здійсненні робіт із землеустрою: наказ від 02.12.2016 № 509. Документ z1646-16, чинний, поточна редакція – прийняття від 02.12.2016. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1646-16>.
11. Савчук С. Г. Вища геодезія: підручник. Житомир, 2005. 315 с.
12. Войтенко С. П. Інженерна геодезія: підручник. Київ: Знання, 2012. 574 с.
13. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність: Закон України. Документ 353-XIV, чинний, поточна редакція – редакція від 27.07.2013, підстава - 367-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14>.

14. Федоров Д. Digital. Использование в геодезии, картографии и землеустройстве. Винница: ООО «Аналитика», 2015. 354 с.

15. Ugnenko Evgeniya, Perova Elena, Voronova Yelizaveta, Viselga Gintas. Improvement of the mathematical model for determining the length of the runway at the stage of aircraft landing. Procedia Engineering. TRANSBALTICA 2017. Transportation science and technology : proceedings of the 10th international scientific conference, May 4-5, 2017, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania. Amsterdam: Elsevier Ltd.. ISSN 1877-7058. Vol. 187 (2017). P. 733-741.

Угненко Євгенія Борисівна, д-р техн. наук, професор, завідувачка кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 057-730-10-67, 057-730-19-56. E-mail: ugnenko.ievgenia@gmail.com.

Ужвієва Олена Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 057-730-10-67, 057-730-19-56. E-mail: elena.uzhviieva.72@gmail.com.

Тимченко Ольга Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 057-730-10-67, 057-730-19-56. E-mail: oleka55@gmail.com.

Камчатна Світлана Миколаївна, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 057-730-10-67, 057-730-19-56. E-mail: Kamchatnayasn@gmail.com.

Ievgeniia Ugnenko, D. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: 057-730-10-67, 057-730-19-56. E-mail: ugnenko.ievgenia@gmail.com.

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. Тел.: 057-730-10-67, 057-730-19-56. E-mail: elena.uzhviieva.72@gmail.com.

Tymchenko Olga, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: 057-730-10-67, 057-730-19-56. E-mail: oleka55@gmail.com.

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. Тел.: 057-730-10-67, 057-730-19-56. E-mail: Kamchatnayasn@gmail.com.

Статтю прийнято 17.04.2019 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 620.91

РОЗРАХУНОК ПОГОДИННОЇ ПРИРОДНОЇ КРАТНОСТІ ПОВІТРООБМІНУ В БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЛЯХ В УМОВАХ МІНЛИВОСТІ ЗОВНІШНЬОГО ТА ВНУТРІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Д-р техн. наук В. І. Дешко, канд. техн. наук І. Ю. Білоус, магістр Г. О. Гетманчук

NATURAL AIR EXCHANGE HOURLY RATE CALCULATION IN MULTISTORY BUILDINGS FOR VARIABLE EXTERNAL AND INTERNAL ENVIRONMENT CONDITIONS

D. Sc. (Tech.) V. Deshko, PhD (Tech.) I. Bilous, H. Hetmanchuk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176404>

Ураховуючи розвиток нормативної бази України щодо оцінки енергоефективності будівель, яка спрямована на зменшення часових інтервалів розрахунку, важливим є розрахунок рівня енергоефективності з урахуванням мінливості умов середовища. Це має безпосереднє відношення до повітрообміну як однієї з найбільш впливових складових енергобалансу будівлі. У статті розглянуто узагальнену методіку розрахунку природної складової кратності повітрообміну та розраховано повітрообмін приміщень восьмиповерхової будівлі.

Ключові слова: *повітрообмін, швидкість та напрям вітру, поверховість, енергоефективність у будівлях.*

Taking into account the development of the normative base of Ukraine regarding the assessment of energy efficiency of buildings, aimed at reducing the time intervals of calculation, it is important to calculate the level of energy efficiency taking into account the variability of environmental conditions. It should be noted that air exchange is one of the most influential components in the energy balance of the building. The article deals with the generalized method of calculating the natural component of the multiplicity of air exchange. The calculations used data file IWEC international climate typical year for the city of Kyiv. In this work the building is considered as a system and the air exchange of premises of the 8 storey building is calculated. The natural component of the multiplicity of air exchange is designed to support air permeability of the most typical characteristics of translucent structures. It is established that for modern double-glazed windows the hourly calculation of the natural component of the multiplicity of air exchange at a different location of representative premises showed that the value does not exceed $0,25 \text{ h}^{-1}$, triple glazing in wooden twisted weaving – $0,4 \text{ h}^{-1}$, double – $0,65 \text{ h}^{-1}$. It should be noted that in the first floors, the natural component of the multiplicity of air exchange has a positive value (air infiltration) on the upper floors, the negative value (air exfiltration), which must be taken into account when dynamically modeling the energy characteristics of the building.

In order to maintain the normative value of the multiplicity of air exchange during the presence of people in the room, it is necessary to use mechanical ventilation additionally. In further

research, it is planned to clarify the conditions of air traffic flooding taking into account the landscape, taking into account mechanical ventilation and recovery.

Keywords: air exchange, speed and direction of wind, superficiality, energy efficiency in buildings.

Вступ. На державному рівні питанням підвищення рівня енергоефективності наявного будівельного фонду для України приділяється значна увага, діє ряд програм та стратегій розвитку від енергонезалежності до енергоефективності. Проблематикою наукового дослідження є удосконалення методів та засобів оцінки енергетичного стану будівель з урахуванням експлуатаційних факторів та мінливості умов середовища.

Зважаючи на поширену європейську практику застосування моделювання на стадії проектування та під час енергетичних аудитів будівель, такі наукові дослідження є цікавими з наукового та практичного погляду.

На енергетичні характеристики будівель впливають теплофізичні властивості оболонки, геометрія, теплонадходження від сонця та додаткові внутрішні параметри, опалення, повітрообмін та особливості експлуатації. З огляду на проведені дослідження [1, 2], найбільш впливовим параметром виступає кратність повітрообміну.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до стандарту [4] щодо рекомендацій першочерговості впровадження енергозберігаючих заходів основна увага приділена заходам з термосанації оболонки будівлі. Після впровадження заходів з термосанації (перший етап) вентиляційна складова теплових навантажень у житлових і комерційних будівлях може становити від 25 до 50 % [4, 5]. Зменшення цієї складової є другим етапом упровадження енергозберігаючих заходів в Україні.

Проведені в останні роки дослідження значну увагу приділяють питанням повітрообміну [6–8]. Дослідження [9] показали, що найбільш впливовим

параметром на енергобаланс будівлі є кратність повітрообміну. Наприклад, витрати на інфільтрацію у Франції становлять 15 % [10]. У США дослідники приходять до висновку, що ця складова сягає 33 % [11].

У розрахунках базового рівня енергоспоживання ця величина приймається відповідно до нормативних значень [12], а її фактичне значення важко визначити експериментально, ураховуючи, що природна складова цього параметра має динамічну природу.

При розрахунку енергетичних характеристик будівель поширеними в Україні стаціонарними й квазістаціонарними методами є кліматичні характеристики для відповідного регіону/обласного центру, а саме: середньомісячні показники зовнішньої температури, сонячні теплонадходження на горизонтальну та вертикальні поверхні для квазістаціонарного методу та середні за опалювальний період – для методу градусо-днів [13]. Вплив швидкості та напрямку вітру в моделях цього кроку дискретизації розрахунків ураховується укрупнено через нормативне значення кратності повітрообміну.

У нормативних кліматологічних даних, що діють в Україні, наведено середньомісячні значення зовнішньої температури повітря та сонячних теплонадходжень на вертикальні та горизонтальну поверхні [14], що є достатнім при стаціонарному та квазістаціонарному методах розрахунку [13].

В умовах ефективного використання енергоносіїв (регулювання опалення) потреба в опаленні повинна розраховуватися з урахуванням погодинної зміни кліматичних характеристик, що неможливо реалізувати в стаціонарних моделях. В Україні все ширшого

застосування набувають динамічні моделі визначення енергетичних характеристик будівель, які потребують використання погодинних кліматичних даних, наприклад, кліматичних погодинних даних типового року файлу IWEC [15].

Визначення мети та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення рівня ефективності управління використанням енергії на основі деталізації експлуатаційних показників кратності повітрообміну багатоповерхових будівель в умовах динамічної зміни характеристик середовища. Задачі дослідження:

- 1) навести узагальнену методику визначення розрахункового значення кратності повітрообміну;
- 2) розробити математичну модель локального визначення кратності повітрообміну в багатоповерхових будівлях;
- 3) провести порівняльний аналіз кратності повітрообміну для різних значень опору повітропроникності для кліматичних даних типового року IWEC [15] файлу.

Основна частина дослідження

Об'єкт дослідження. Для дослідження енергетичних характеристик будівлі було розглянуто групу репрезентативних кімнат південної та північної орієнтації для теплофізичних властивостей огорожень, характерних масовій забудові: 1) з двокамерними склопакетами в ПВХ-профілях; 2) потрійним застеленням у дерев'яних спарених плетіннях; 3) подвійним застеленням у дерев'яних спарених плетіннях (старі світлопрозорі конструкції). Будівля має 8 поверхів, де підтримується постійна температура повітря в приміщеннях 18 °С. На основі обраних репрезентативних приміщень (на 1, 3, 6-му

поверхах північної та південної орієнтації) проведено дослідження зміни кратності повітрообміну в багатоповерховій будівлі з різними типами повітропроникності вікон. Використані погодинні значення з файлу IWEC для кліматичних умов Києва містять температуру сухого термометра, відносну вологість, швидкість та напрям вітру, барометричний тиск, повну, пряму (виражену через direct normal) та розсіяну (diffuse horizontal) сонячну радіацію на горизонтальну поверхню тощо. Процедура отримання даних була основана на виборі типового року протягом 18-річної послідовності погодних даних.

Методика визначення природної складової кратності повітрообміну в умовах мінливості зовнішнього середовища

Зазвичай у математичні моделі для визначення енергопотреб будівель вентиляційна складова (повітрообмін) задається через значення кратності повітрообміну. Повітрообмін важко визначити експериментально. Навіть при однакових конструкціях вікон, з погляду повітропроникності, природно в приміщення потрапляє різна кількість повітря. Повітрообмін у приміщенні залежить від ряду факторів, як зовнішніх, так і внутрішніх. У роботі використано узагальнення методик визначення кратності повітрообміну, основаних на визначенні різниці тисків, наведених у дослідженнях [4, 16, 17], та підходи ASHRAE [18, 19]. Різниця тисків у будівлі створюється трьома різними механізмами: ефект стека (stack effect), тиск вітру, примусовий тиск вентилятора механічної вентиляції (рис. 1), – як їх сума:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_s + \Delta P_w + \Delta P_v = \Delta P_{inf} + \Delta P_v, \quad (1)$$

де ΔP_{tot} – загальна різниця тисків, Па;

ΔP_s – різниця тисків від ефекту стека, Па;

ΔP_w – різниця тиску від вітру, Па;

ΔP_v – різниця тисків від примусової вентиляції, Па;

ΔP_{inf} – інфільтраційна різниця тисків, Па.

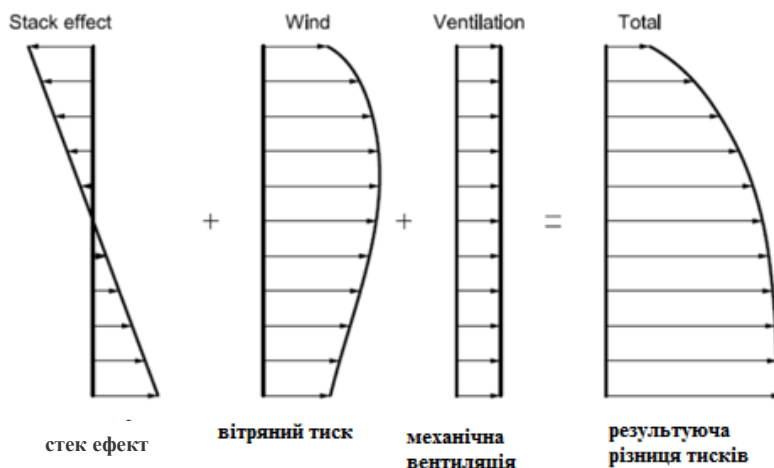


Рис. 1. Приклад підсумування профілів різниці тиску [17]

Ефект стека також називають ефектом плавучості, що створюється різницею густин між теплим і холодним повітрям. Зниження тиску повітря з висотою визначається за формулою

$$\Delta P_s = P_e(z) - P_i(z) = z(\rho_e - \rho_i)g, \quad (2)$$

де z – висота від опорної точки, м;

ρ_e, ρ_i – густина зовнішнього та внутрішнього повітря, кг/м^3 ;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

На рис. 2 висота характеризує нейтральний рівень тиску (NPL), при якому внутрішній та зовнішній тиски однакові, зазвичай цей рівень міститься на середньому поверсі будівлі.

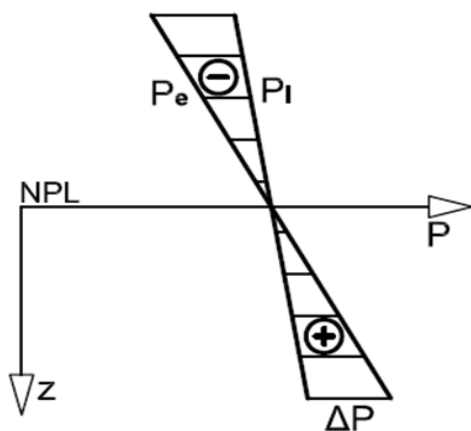


Рис. 2. Величина різниці тисків від рівня нейтрального тиску [17]

Від рівня нейтральних тисків у бік першого поверху різниця тисків додатна, у бік останнього поверху – від’ємна. Припустивши, що повітря – це ідеальний газ, формула (2) набуває вигляду

$$\Delta P_s = 3456 \cdot z \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right), \quad (3)$$

де T_e, T_i – температура зовнішнього та внутрішнього повітря, відповідно К.

Вітряний тиск створюється, коли потік повітря потрапляє на перешкоду. Величина вітряного тиску залежить від швидкості вітру та форми перешкоди (навітряний, підвітряний бік тощо).

У більшості програмних продуктів для моделювання тиску вітру використовується така рівність [16–18, 4]:

$$\Delta P_w = \frac{\rho U_{met}^2}{2} C_h C_p(\theta), \quad (4)$$

де ΔP_w – вітряний перепад тиску, Па;

ρ – густина навколишнього середовища, кг/м^3 ;

U_{met} – швидкість вітру за даними найближчої метеостанції, м/с;

C_h – коефіцієнт тиску вітру, що враховує поверховість:

$$C_h = \frac{U_h^2}{U_{met}^2} = A_0^2 \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^{2a}, \quad (5)$$

U_h – швидкість вітру в найвищій точці об'єкта, м/с;

A_0 – коефіцієнт, що враховує укриття від вітру для певної місцевості (the wind shelter coefficient) [17];

H – висота розглянутого поверху будівлі від рівня землі, м;

H_{ref} – висота, на якій метеостанція міряє швидкість вітру, м;

a – експоненціальний коефіцієнт, що враховує укриття від вітру для цієї місцевості [17].

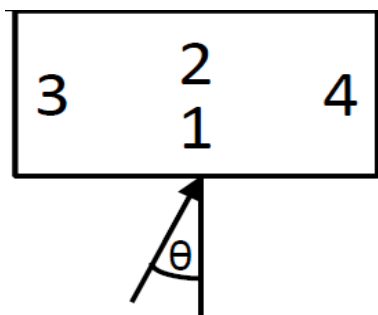
Сама особливість напрямку вітру врахована коефіцієнтом C_p . Коефіцієнт вітряного тиску для певного кута визначається за формулою

$$C_p(\theta) = \frac{1}{2} \{ [C_p(0^\circ) + C_p(180^\circ)] \cdot (\cos^2(\theta))^{1/4} + [C_p(0^\circ) - C_p(180^\circ)] \cdot (\cos^2(\theta))^{3/4} + [C_p(90^\circ) + C_p(270^\circ)] \cdot (\sin^2(\theta))^2 + [C_p(90^\circ) - C_p(270^\circ)] \cdot (\sin^2(\theta)) \} \quad (6)$$

де $C_p(\theta)$ – коефіцієнт тиску вітру,

θ – величина кута вітру відносно нормалі, °.

На рис. 3 зображено визначення величини кута відносно нормалі та обчислено значення вітряних коефіцієнтів для різних орієнтацій залежно від напрямку вітру.



Розташування	Кут набігання вітру на поверхню відносно нормалі (θ)							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
поверхня 1	0.25	0.06	-0.35	-0.6	-0.5	-0.6	-0.35	0.06
поверхня 2	-0.5	-0.6	-0.35	0.06	0.25	0.06	-0.35	-0.6
поверхня 3	-0.6	0.2	0.4	0.2	-0.6	-0.6	-0.3	-0.6
поверхня 4	-0.6	-0.6	-0.3	-0.6	-0.6	0.2	0.4	0.2

Рис. 3. Визначення кута θ та розраховане значення коефіцієнта тиску вітру – $C_p(\theta)$ для всіх огорожень [17]

Отже, кількість повітря, що надходить у кімнату через нещільність за прийнятих умов відсутності механічної вентиляції, визначається таким співвідношенням:

$$G_{inf} = C(\Delta P_{inf})^P$$

$$\text{або } G_{inf} = \frac{\Delta P_{inf}^P}{R_{пов.прон}} F_v \quad (7)$$

де G_{inf} – кількість повітря, що надходить у приміщення через нещільності, кг/год;

C, p – даний коефіцієнт та показник степеня залежить від призначення будівлі [4, 16];

$R_{пов.прон}$ – опір повітропроникності вікна, (м²·год·Па^{2/3})/кг [20];

F_v – площа вікна, м².

Кратність повітрообміну в приміщенні як характеристика вузла вентиляції у математичних моделях визначається за таким співвідношенням [20]:

$$n = \frac{G_{inf}}{\rho V}, \quad (8)$$

де V – об'єм приміщення, m^3 ;

n – кратність повітрообміну, $год^{-1}$.

Наведена методика дає змогу враховувати потоки інфільтрації та

ексфільтрації повітря з/в зону кімнати (рис. 4, б), що суттєво впливає на енергетичні характеристики.

Розрахунок погодинної природної кратності повітрообміну відповідно до кліматичних даних IWEC типового року

У кліматичному файлі типового року IWEC [15] наведено погодинні дані швидкості та напрямку вітру. Напрямок вітру заданий у градусах. На рис. 4, а наведено особливість визначення напрямку вітру відповідно до кута.

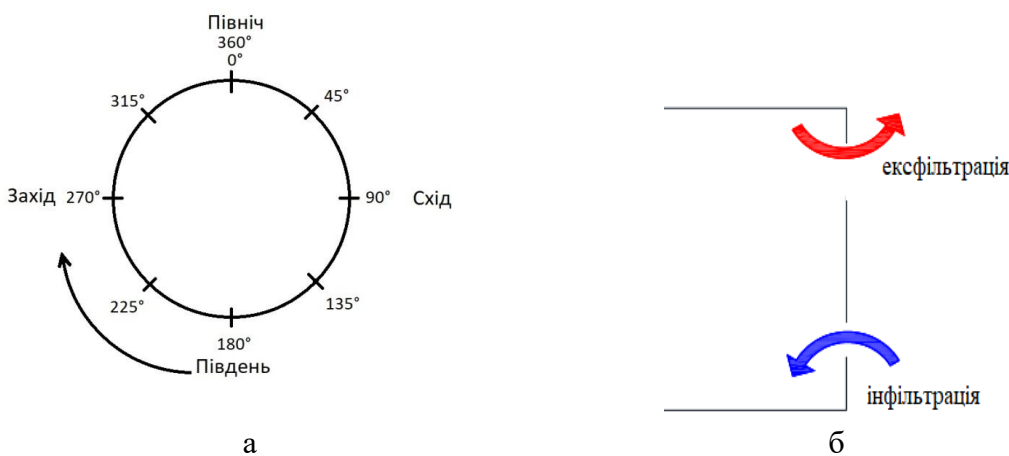


Рис. 4. Визначення напрямку вітру, заданого кутом відповідно до файлу типового року IWEC, (а) та механізм повітрообміну в багатоповерховій будівлі (б)

За наведеною вище методикою було визначено зміну різниці тисків від ефекту стека (рис. 5), тиску вітру (рис. 6) та загальну різницю тисків залежно від зміни таких параметрів, як температура, напрям вітру та швидкість вітру. Дані репрезентативних днів, що були необхідні для розрахунку, взяті з кліматичного IWEC файлу типового року для Києва [15].

На рис. 5 наведено графік профілів зміни тисків по висоті від ефекту стека залежно від зміни температури навколишнього середовища. Як наведено в методиці, це явище пов'язане з різницею густин між теплим і холодним повітрям і не залежить від орієнтації приміщення.

У роботі досліджено зміни різниці тиску по висоті для різної швидкості й напрямку вітру та їх вплив на підвітряні й навітряні огороження. На рис. 6 подано відповідні графіки профілів зміни тисків від вітру на південному боці будівлі залежно від поверху будівлі та напрямку вітру. Репрезентативними були обрані дні, у яких швидкість вітру становила 3 м/с (типова швидкість вітру для умов України [14]), а температура зовнішнього повітря – $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (середня типова температура зовнішнього повітря для грудня в Києві [21]). З графіків видно, що величина зміни тиску від вітру зростає з висотою. З навітряного боку будівлі величина вітряного тиску є додатною, а з підвітряного – від'ємною.

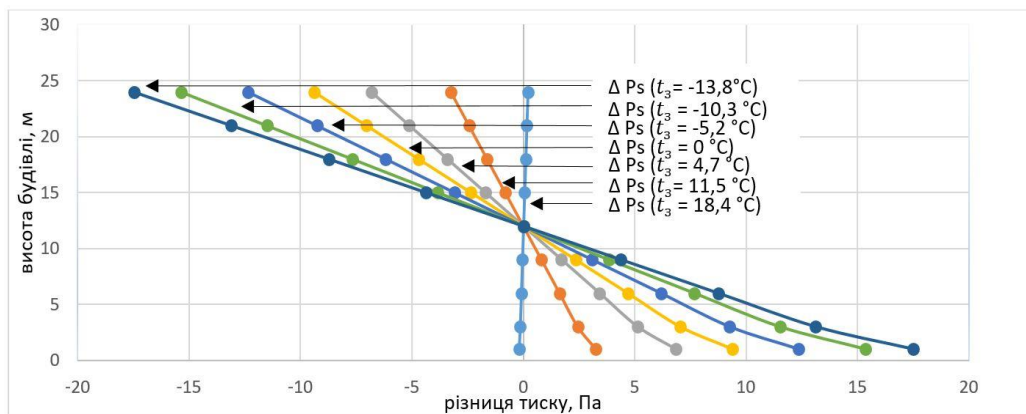


Рис. 5. Зміна тиску від ефекту стека залежно від зміни температури повітря навколишнього середовища

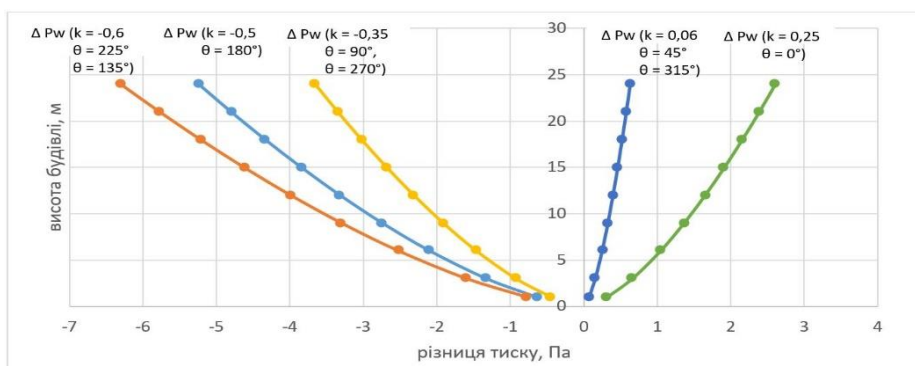


Рис. 6. Зміна тиску від вітру залежно від зміни напрямку вітру на південному боці будівлі

На рис. 7 наведено графік профілів зміни тисків від вітру на північному та південному боках залежно від зміни швидкості вітру для типових напрямів – північного (рис. 7) та північно-західного. Температура зовнішнього повітря в обрані

для аналізу дні становить -3°C . Вітер зі швидкістю більше 8 м/с характерний для північно-західного напрямку. З аналізу випливає, що різниця тиску вітру збільшується зі зростанням швидкості вітру.

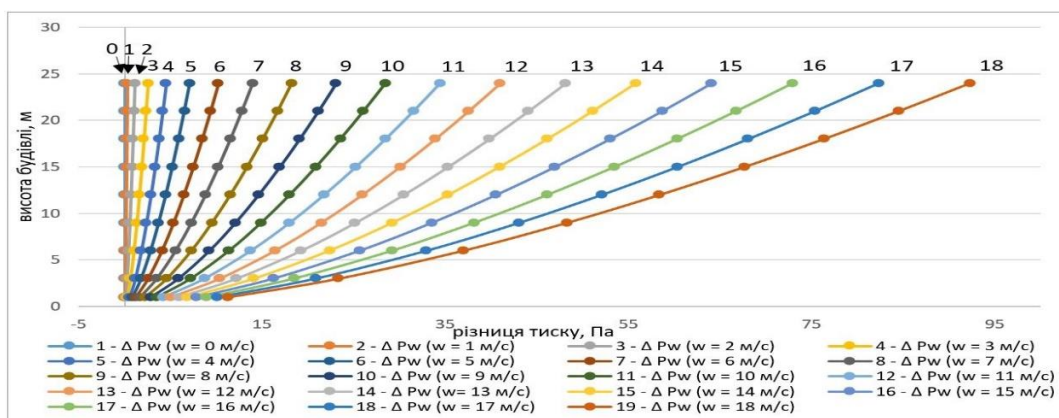


Рис. 7. Зміна тиску вітру залежно від зміни швидкості вітру при північному напрямі вітру на північному боці будівлі

У роботі досліджено природну складову повітрообміну, що визначається через суму різниці тисків від ефекту стека та вітряного ефекту.

На рис. 8 наведено змінну кратності повітрообміну для різного опору повітропроникності світлопрозорих огорожень.

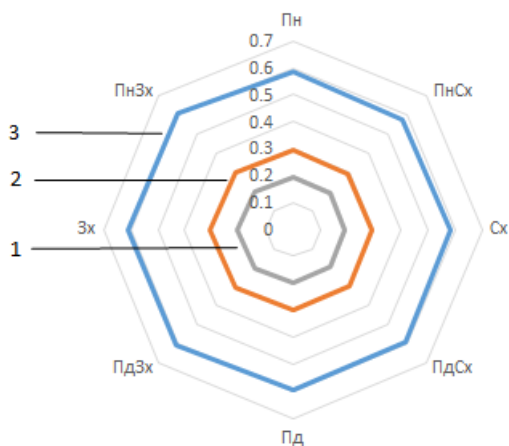
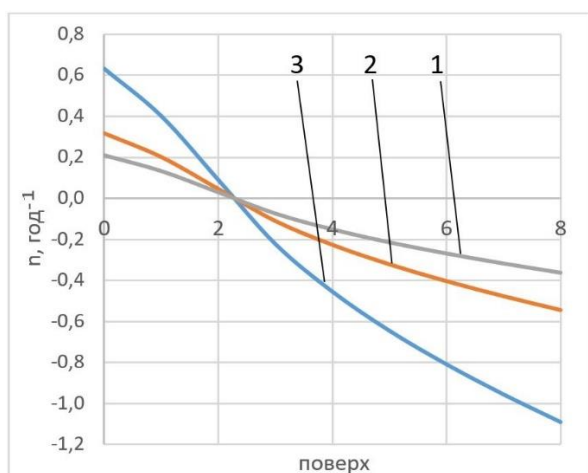


Рис. 8. Середня за опалювальний період природна кратність повітрообміну для приміщень першого поверху різної орієнтації та повітропроникності огорожень:

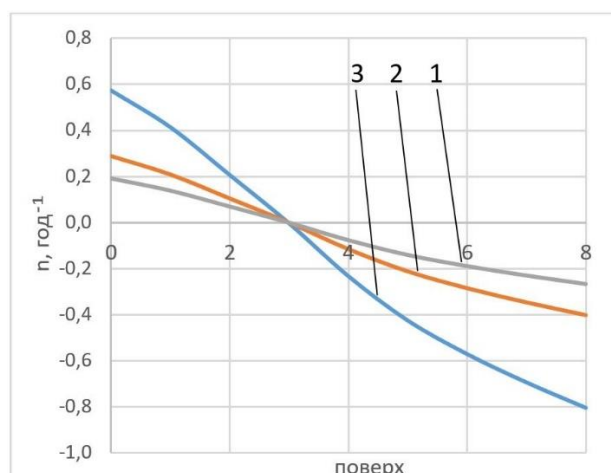
1 – двокамерний металопластиковий склопакет з ПВХ профілем; 2 – потрійне застклення в дерев'яних спарених плетіннях; 3 – подвійне застклення

З рис. 8 видно, що природна кратність повітрообміну для приміщень ПнСх орієнтації дещо менша, що пов'язано з напрямом вітру, різниця більш помітна для вікон з меншим опором повітропроникності. У середньому природна величина кратності повітрообміну становить біля $0,25 \text{ год}^{-1}$ – для металопластикових двокамерних склопакетів, $0,4 \text{ год}^{-1}$ – потрійне застклення в дерев'яних плетіннях, $0,65 \text{ год}^{-1}$ – подвійне застклення. З аналізу випливає, що кратність повітрообміну удвічі більша для дерев'яних вікон. Ця величина фактично може бути більша для старих вікон з дерев'яними рамами, які збільшили повітропроникність у процесі експлуатації.

Як згадувалося вище, розглянута методика дає змогу враховувати як інфільтраційні, так і ексфільтраційні природні потоки повітря в будівлі. На рис. 9 наведено приклад зміни кратності повітрообміну для приміщень північної (Пн) орієнтації розглянутої будівлі для різних значень коефіцієнтів повітропроникності. Для періоду міжсезоння кратність повітрообміну дещо зменшується порівняно з холодним періодом, що пояснюється зменшенням різниці температур між внутрішнім та зовнішнім середовищем.



а



б

Рис. 9. Середня кратність повітрообміну репрезентативних приміщень Пн орієнтації для різних типів віконних конструкцій для січня (а) та березня (б)

На першому поверсі спостерігається явище інфільтрації (приплив свіжого повітря природно через нещільності у віконних конструкціях), на середньому поверсі по всіх місяцях кратність у середньому близька до нуля, що пов'язано зі NPL будівлі (ефект стека), на останніх поверхах спостерігається ексфільтрація, якій відповідають від'ємні значення кратності. З огляду на баланс кратності природного повітрообміну розглянутої восьмиповерхової будівлі, кількість інфільтрованого та ексфільтрованого повітря однакова, тобто для розглянутого періоду сума кратностей повітрообміну дорівнює нулю.

У роботі проведено погодинний розрахунок кратності повітрообміну протягом опалювального сезону для восьмиповерхової будівлі. На рис. 10 наведено погодинну зміну кратності повітрообміну на прикладі приміщень першого поверху Пн орієнтації.

З рис. 10 випливає, що вікна з покращеними теплофізичними характеристиками менш чутливі до коливань параметрів зовнішнього середовища. Загалом діапазон зміни природної кратності повітрообміну $0 \dots 0,25 \text{ год}^{-1}$ для двокамерних склопакетів з ПВХ профілем, $0 \dots 0,5 \text{ год}^{-1}$ – для вікон з потрійним заскленням у дерев'яних плетіннях, $0 \dots 1 \text{ год}^{-1}$ – для подвійного засклення.

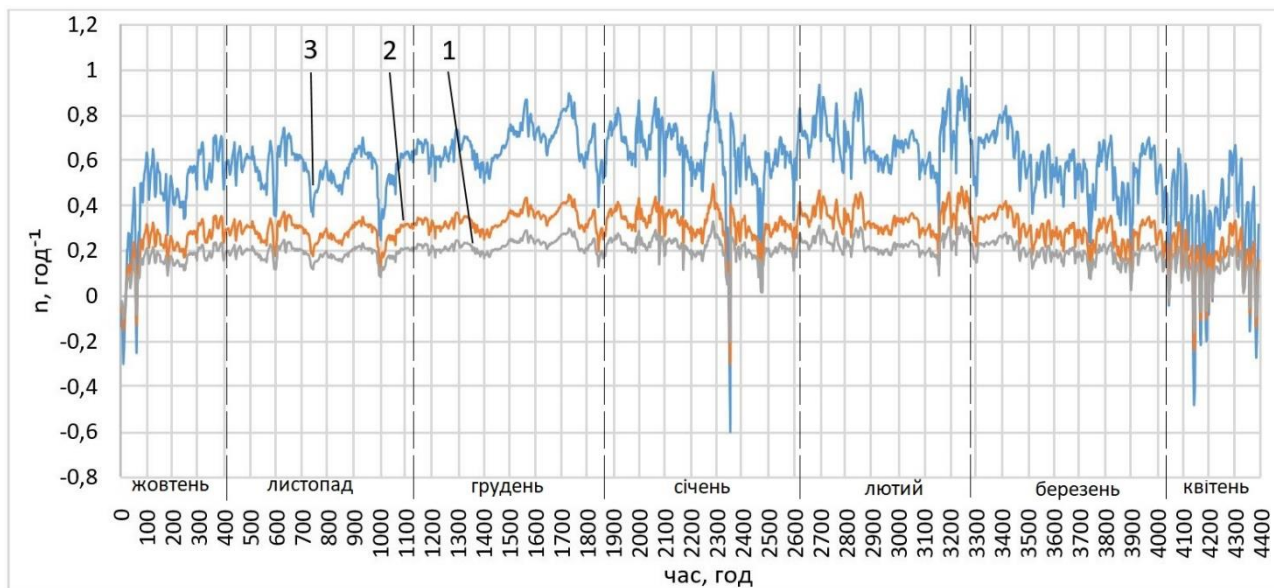


Рис. 10. Погодинна зміна природної кратності повітрообміну для приміщення першого поверху Пн орієнтації

Висновки. У роботі розглянуто літературні джерела та підходи до оцінки природного повітрообміну в будівлі з урахуванням сукупної мінливості ряду зовнішніх та внутрішніх факторів. Запропоновано узагальнену методику визначення природної кратності повітрообміну. У розрахунках використано дані міжнародного кліматичного файлу

IWEC типового року для Києва [15]. Природна складова кратності повітрообміну розрахована для опору повітропроникності найбільш типових характеристик світлопрозорих конструкцій, а саме: двокамерний склопакет з ПВХ профілем, потрійне та подвійне засклення в дерев'яних спарених плетіннях. Розрахунок проводився для репрезентативних

приміщень восьмиповерхової будівлі, що мають одне вікно різної орієнтації.

Для сучасних склопакетів погодинний розрахунок природної складової кратності повітрообміну при різному розташуванні репрезентативних приміщень показав, що значення не перевищує $0,25 \text{ год}^{-1}$, потрібне засклення в дерев'яних спарених плетіннях – $0,4 \text{ год}^{-1}$, подвійне – $0,65 \text{ год}^{-1}$. Потрібно відмітити, що на перших поверхах природна складова кратності повітрообміну має додатне значення (інфільтрація повітря) на останніх поверхах – від'ємне

значення (ексфільтрація повітря), що потрібно враховувати при динамічному моделюванні енергетичних характеристик будівлі. Для підтримання нормативного значення кратності повітрообміну при перебуванні людей у приміщенні потрібно додатково використовувати механічну вентиляцією.

У подальших дослідженнях заплановано уточнення умов обтікання будівлі повітрям з урахуванням ландшафту, механічної вентиляції та рекуперації.

Список використаних джерел

1. Maslesa I., Jensen P., Birkved M. Indicators for quantifying Environmental Building Performance: A systematic literature review. *Journal of building engineering*. 2018. Vol. 19. P. 552-560.
2. Bilous I., Deshko V., Sukhodub I. O. Building inside air temperature parametric study. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 8. P. 65–75.
3. ДСТУ-Н Б В.3.2-3:2014. Настанова з виконання термомодернізації житлових будинків. [Чинний від 2015-10-01]. Київ: Мінрегіон України, 2015. 40 с.
4. Mechouet A., Mouhib T., Balhamri A., Ouali E. M. Evaluating the impact of air infiltrations on the thermal and energy performances for different types of dwellings in casablanca city. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*. 2018. Vol. 8. P. 793–800.
5. Younes C., AbiShihid C., Bitsuamlak G. Air infiltration through building envelopes: A review. *Journal of Building Physics*. 2011. Vol. 35-3, P. 267–302.
6. Kalamees T. Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*. 2007. Vol. 42. P. 2369–2377.
7. Jokisalo J., Kurnitski J., Korpi M., Kalamees T., Vinha J. Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for finnish detached houses. *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. P. 377–387.
8. Chen S., Levine M., Li H., Yowargana P., Xie L. Measured air tightness performance of residential buildings in North China and its influence on district space heating energy use. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 51. P. 157–164.
9. Bilous I., Deshko V., Sukhodub I. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of building engineering*. 2018. Vol. 20. P. 327–336.
10. Leprince V., Lyon C. Les rencontres de l'Arcad, Etanchéité à l'air des enveloppes. 2011. Vol. 20.
11. Emmerich S., Persily A., Dowell T. Impact of infiltration on heating and cooling loads in US office buildings. *Proceedings of the 26th IEA Conference of the Air Infiltration and Ventilation Center*. 2005.
12. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому

водопостачанні [Уведений вперше; чинний від 2015.01.01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2015. 140 с.

13. Bilous I., Deshko V. Mathematical models for determination of specific energy need for heating and cooling of the administrative building. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4.3). P. 325–330.

14. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010.Будівельна кліматологія. Київ, 2011. 127 с.

15. Міжнародний кліматичний файл погоди IWEC для типового року. URL: https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR//UKR_Kiev.333450_IWEC.

16. Biler A., Taval A., Su Y., Kha N. A Review of Performance Specifications and Studies of Trickle Vent. *Buildings*. 2018. Vol. 8. P. 152–183.

17. BERGE A. Analysis of Methods to Calculate Air Infiltration for Use in Energy Calculations. Sweden, 2011. 98 p.

18. ASHRAE Standard 62.2-2003 Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings.

19. ASHRAE Fundamentals Handbook. 1997. P. 85

20. ДСТУ Б В.2.2-19:2007. Метод визначення повітропроникності огорожувальних конструкцій в натурних умовах. Київ: Укрархбудінформ, 2008. 20 с.

21. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні [Уведений вперше; чинний від 2015.01.01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.

Дешко Валерій Іванович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Білоус Інна Юріївна, канд. техн. наук, асистент кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Гетманчук Ганна Олександрівна, магістр кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Deshko Valerii Ivanovych, D. Sc. (Tech), Professor, Head of Department of Heat Engineering and Energy Saving NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. E-mail: te@kpi.ua, ORCID: 0000-0002-8218-3933, Scopus Author ID: 6506189670.

Bilous Inna Yuriiivna, PhD (Tech.), Assistant lecturer, Department of Heat Engineering and Energy Saving NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine). E-mail: biloys_inna@ukr.net, tel.:+38 (068)-015-15-63, ORCID: 0000-0002-6640-103X, Scopus Author ID: 57194104035. *Researcher ID*: J-7070-2017.

Hetmanchuk Hanna, master, Department of Heat Engineering and Energy Saving NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine). E-mail: hetmanchuk.anna@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1655-8642.

Статтю прийнято 12.03.2019 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.025

ГЛОБАЛЬНІ МЕГАТРЕНДИ ЛЮДСТВА, ЧЕТВЕРТА ПРОМИСЛОВА РЕВОЛЮЦІЯ ТА НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МАЙБУТНЬОЇ ЕКОНОМІКИ. ВЕЛИКІ ДАНІ

Д-р техн. наук О. В. Григоров, кандидати техн. наук Г. О. Аніщенко, В. В. Стрижак, Н. О. Петренко, О. В. Турчин, А. О. Окунь

GLOBAL MEGATRENDS OF HUMANITY, FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION AND DEVELOPMENTS OF THE FUTURE ECONOMY. BIG DATA

D. Sc. (Tech.) O. Grygorov, PhD (Tech.) G. Anischenko, PhD (Tech.) V. Stryzhak, PhD (Tech.) N. Petrenko, PhD (Tech.) O. Turchyn, PhD (Tech.) A. Okun

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176408>

У статті розглянуто основні ознаки Великих даних, галузь їх застосування, зв'язок із машинним навчанням. Наведені інструменти для роботи з Великими даними, приклади можливостей таргетованої реклами на основі їх аналізу. Оцінено перспективи та труднощі використання принципів Big Data на базі прикладів застосування у транспортних системах, логістичних комплексах, ліфтобудуванні й медицині.

Ключові слова: глобальні мегатренди, транспортні технології, Великі дані, Індустрія 4.0, таргетована реклама, логістичні системи, транспортні системи.

The article deals with the main features of Big Data, the area of their application, the connection with machine learning. It is described that a self-studying program receives an arbitrary set of data units that conform to a certain pattern and after studying this set, the program is a model of this pattern, that is, a set of criteria by which the algorithm can determine whether a specific unit of data is the desired pattern or not. In the future, applying this model to a new and random data set, the program can find in it the units of data in which the pattern is executed. Professional tools for working with Big Data, such as software products and distributed computing (cloud computing) are considered. The means for working with Big Data, examples of targeted advertising based on their analysis are described. The effectiveness of targeted advertising application based on the use of analysis of character traits using the most popular personality model "Big Five" known also as OCEAN (openness to experience, conscientiousness, extraversion, agreeableness, neuroticism), surface characteristics and human way of life are estimated. The effectiveness of personalized advertising on the basis of the results of psychometric analysis using Big Data on an example of an election campaign is investigated. It is shown how the electorate's research was conducted, through simulation, division into different segments, with each of them being actively interacted with ethereal and targeted television advertising, as well as through advertising on the Internet. An estimation of perspectives and difficulties of using Big Data principles on the basis of application examples in various transport systems, resource savings, logistic complexes and systems, elevator building and medical industry.

Keywords: global megatrends, transport technologies, Big Data, Industry 4.0, targeted advertising, logistic systems, transport systems.

Вступ та аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи – крани-штабелери, велосипедні крани й навантажувачі, оснащені автоматизованими системами керування, в поєднанні з ІТ технологіями все більше застосовуються в логістичних і транспортних системах і комплексах [1–8].

Для того, щоб визначити роль галузі знань «Прикладна механіка» (спеціалізація «Інженерія логістичних систем»), розглянемо проблеми більш широко, а саме: вивчимо «мегатренди» і «мегатенденції» людства (рис. 1) [9–11].



Рис. 1. Глобальні мегатренди

Як бачимо, людство в наш час переймається демографічними змінами (зсувами), змінами в економічній могутності, прискореною урбанізацією, кліматичними змінами, дефіцитом ресурсів

і технологічним прогресом, його наслідками та окремими загрозами.

Людство перебуває в стані завершення четвертої промислової революції (рис. 2).



Рис. 2. Індустрія 4.0 (Industry 4.0)

Четверта промислова революція – подія, що прогнозується, це – масове впровадження кіберфізичних систем у виробництво (Індустрія 4.0), що обслуговує людські потреби, зокрема побут, працю та дозвілля.

Визначення мети та завдання дослідження. Зміни будуть охоплювати різні сторони життя: ринок праці, життєве середовище, політичні системи, технологічний устрій, людську ідентичність, промисловість, транспортні системи та ін. Четверта промислова революція спричинена економічною доцільністю та привабливістю підвищення якості життя, несе у собі ризики підвищення нестабільності та можливого колапсу світової системи, у зв'язку з чим її настання сприймається як виклик, на який людству доведеться відповісти.

Основна частина

Визначення напрямків розвитку. Як бачимо, Індустрія 4.0 складається з автономних роботів, систем інтеграції, Інтернету речей, моделювання, технології пошарового друку, хмарної обробки даних, доповненої реальності, «великих даних», кібербезпеки.

Виклики, з якими стикається Індустрія 4.0:

- роботи + штучний інтелект + автоматизація;
 - 7,1 млн робочих місць буде втрачено та 2,1 млн робочих місць створено;
 - етичні міркування;
 - людина проти технології;
 - відсутність необхідних навичок – розробка нових навчальних програм.
- Нові можливості для Індустрії 4.0:
- доповнена реальність + віртуальна реальність;
 - доповнена реальність + IoT (Інтернет речей) + великі бази даних (тематичні парки, ресторани);
 - доповнена реальність + IoT (культурний спадок міст);
 - доповнена реальність + штучний інтелект (охорона здоров'я, підготовка солдатів, освіта);
 - робот + штучний інтелект (готелі);
 - робот + безпілотник + доповнена реальність (безпека на складах, логістика);
 - віртуальна/доповнена реальність + безпілотник (туризм, транспорт);
 - гуманістичний підхід;
 - якість життя + продуктивність праці.

Економіка наступного покоління умовно може розвиватися в напрямку 10 основних технологій (рис. 3).



Рис. 3. Напрямки розвитку майбутньої економіки

На рис. 3, зверху за годинниковою стрілкою: 1 – безпілотні апарати (дрони); 2 – блокчейн (вибудувана за певними правилами безперервна мережа послідовних ланцюгів блоків, що містять інформацію); 3 – великі масиви даних (це термін для наборів даних, які настільки великі та складні, що традиційне прикладне програмне забезпечення для обробки даних не підходить для вирішення цих проблем. Проблеми великих масивів даних містять у собі збір даних, їх зберігання та аналіз, пошук, обмін, передачу, візуалізацію, запит, оновлення та конфіденційність інформації); 4 – доповнена реальність (результат введення в поле сприйняття будь-яких сенсорних даних з метою доповнення відомостей про оточення та покращення сприйняття інформації); 5 – 3D-друк; 6 – віртуальна реальність (створення за допомогою технічних засобів світу (об’єкти та суб’єкти), що передається людині через її відчуття: зір, слух, нюх, дотик та ін. Віртуальна реальність імітує як вплив, так і реакції на вплив. Для створення переконливого комплексу відчуттів реальності, синтез властивостей та реакцій віртуальної реальності здійснюється в реальному часі); 7 – штучний інтелект; 8 – роботи; 9 – Інтернет речей – IoT (концепція обчислювальної мережі фізичних предметів

(«речей»), що оснащені вбудованими технологіями для взаємодії один з одним або із зовнішнім середовищем. Ця концепція розглядає організацію таких мереж, як явище, здатне перебудувати економічні та суспільні процеси, що виключає з частини дій та операцій необхідність участі людини; 10 – генетика. Такі напрямки розвитку, як Інтернет речей, віртуальна та доповнена реальність і кібербезпека, ми розглядали у роботі [11].

У зв’язку з цим розглянемо лише Великі масиви даних (Big Data), як найбільш наближений аспект до проблем сучасної логістики та транспортних систем.

Найбільш повним визначенням терміну Big Data буде таке. Великі дані – серія підходів, інструментів і методів обробки структурованих та неструктурованих даних величезних обсягів і значного різноманіття, ефективних в умовах безперервного приросту даних і їх розподілу на численних вузлах обчислювальної мережі з метою отримання доступних для сприйняття людиною результатів.

Надалі Великими даними будуть називатись як самі дані, так і інструменти для роботи з ними. Також варто розглянути основні ознаки Великих даних, які часто позначають аббревіатурою VVV (рис. 4).

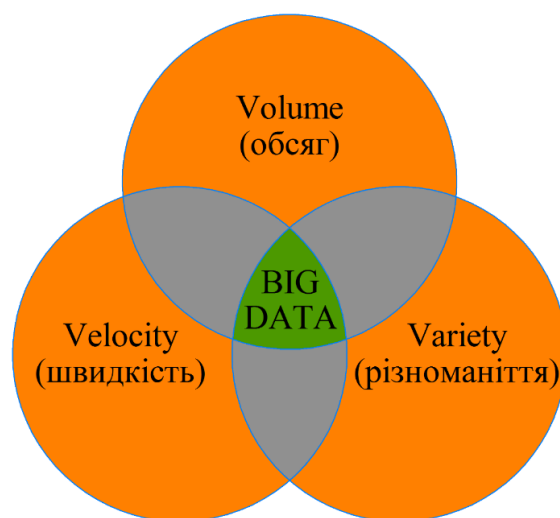


Рис. 4. Ознаки Великих даних VVV

Перша ознака, Volume (обсяг), говорить про те, що Великі дані мають великий обсяг.

Друга ознака, Variety (різноманіття), говорить про те, що Великі дані складаються з інформації найрізноманітніших типів. Це не тільки текстова інформація, яка сама по собі досить різноманітна, але і аудіо, відео, а також графічні зображення. Класичні бази даних і програми для взаємодії з ними спроектовані так, щоб працювати з числами і текстом, згрупованими в таблиці, але далеко не всю інформацію про реальний світ, результати наукових експериментів тощо можна структурувати таким чином. Для таких випадків і потрібні технології Великих даних.

І, нарешті, третя ознака, Velocity (швидкість), вказує на те, що алгоритми роботи Великих даних повинні бути досить ефективними і, як наслідок, швидкими. Оскільки Великі дані об'ємні, різноманітні і постійно поповнюються, їх швидка обробка вкрай важлива.

Об'єднавши обсяг, різноманіття і швидкість, ми отримаємо дані, робота з якими вимагає такого рівня гнучкості бази даних, якого важко або навіть неможливо досягти, використовуючи тільки звичайні і поширені технології. Якщо дані змінюються або змінюється те, що ці дані описують, або потрібно об'єднати дані з інформацією, отриманою з іншого потоку або сховища даних, необхідно повністю змінити структуру сховища і принципи роботи з такими даними.

Галузь застосування

Типовий приклад Великих даних – це інформація, яка надходить з різних фізичних експериментальних установок, наприклад з Великого адронного колайдера, який постійно створює величезну кількість даних. Установка безперервно видає великі обсяги даних, а вчені з їх допомогою вирішують паралельно безліч завдань.

Поява Великих даних у публічному просторі була пов'язана з тим, що вони набули широкого розповсюдження не тільки у науковому середовищі, де такі завдання вирішуються давно, а й у повсякденному житті. У публічну сферу технології Big Data вийшли, коли мова стала йти про цілком конкретне число – кількість жителів планети. Мільярди людей збираються на YouTube, Facebook, Instagram та інших проектах, а кількість операцій, які вони здійснюють одночасно, величезна. Потік даних у цьому випадку – це дії користувача на сайті. Під їх обробкою розуміється не тільки інтерпретація, але й можливість правильно обробити кожну з цих дій, тобто помістити її в потрібне місце і зробити так, щоб ці дані були швидко доступні кожному користувачу, оскільки соціальні мережі працюють у реальному часі.

Великі дані також активно використовуються разом з Інтернетом речей. Усе більше входять в обіг речі, які обслуговують завдання людини (наприклад, сучасний розумний годинник, GPS-трекер) та бізнесу (логістичні системи і комплекси, транспортні технології) і збирають велику кількість інформації, яку необхідно аналізувати.

Розподілені обчислення

Обсяги Великих даних, з якими доводиться працювати на сучасному етапі розвитку технологій, можуть сягати кількох петабайт. Для обробки таких обсягів даних необхідні комп'ютери, що мають виняткову обчислювальну потужність.

Найбільш очевидним способом отримання цієї потужності є нарощування продуктивності одного конкретного комп'ютера аж до перетворення його в суперкомп'ютер. Однак такий підхід має істотний мінус – потужність окремо взятого комп'ютера завжди буде обмежена поточним розвитком технологій.

Для отримання системи, продуктивність якої можна необмежено масштабувати, використовується технологія розподіле-

них обчислень. Вона передбачає, що обчислення проводяться паралельно на декількох комп'ютерах, об'єднаних в одну обчислювальну систему. Така система комп'ютерів, з'єднаних високошвидкісними каналами зв'язку, називається кластером. Високопродуктивні кластери є окремим видом суперкомп'ютерів, які

називаються ґрид (від англ. Grid – решітка, мережа).

Моделлю розподілених обчислень, яку часто використовують для роботи з Великими даними, є представлена компанією Google парадигма MapReduce. Її назва сформована з двох кроків, що входять у цю модель: Map і Reduce (рис. 5).

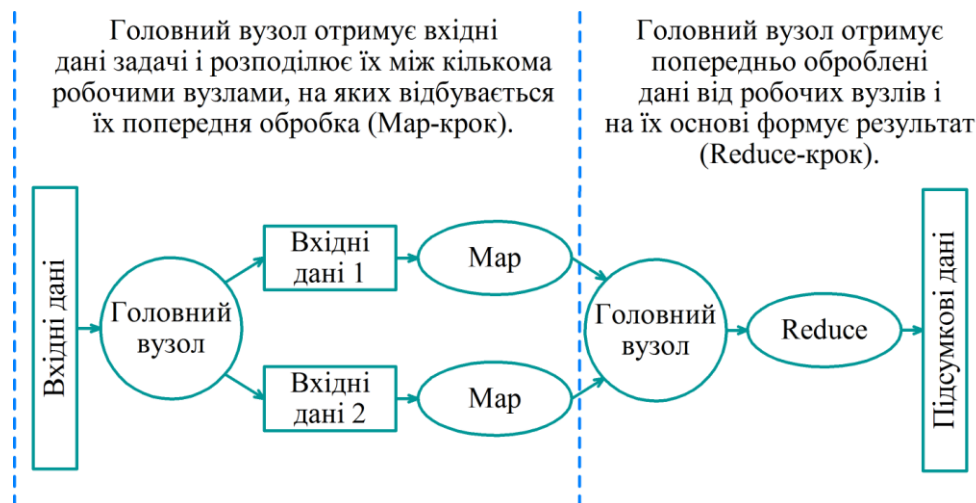


Рис. 5. Розподілені обчислення згідно з моделлю MapReduce

На Map-кроці відбувається попередня обробка вхідних даних. Для цього один з комп'ютерів (головний вузол) отримує вхідні дані задачі, розділяє їх на частини і передає іншим комп'ютерам (робочим вузлам) для попередньої обробки.

На Reduce-кроці відбувається згорання попередньо оброблених даних. Головний вузол отримує відповіді від робочих вузлів і на їх основі формує результат – розв'язання задачі, яка була сформульована на початку.

Машинне навчання і Великі дані

Для аналізу Великих даних часто використовуються алгоритми, основані на машинному навчанні. Машинне навчання (Machine Learning) – клас методів штучного інтелекту, характерною рисою яких є не пряме вирішення завдання, а навчання в процесі вирішення безлічі схожих завдань. Таким чином, основана на машинному

навчанні програма не вимагає жорсткого програмування своєї поведінки, а, навпаки, здатна самостійно навчатися, формуючи і покращуючи свої алгоритми.

На практиці це виглядає таким чином (рис. 6). Програма, що навчається, отримує якийсь набір одиниць даних, які відповідають певній закономірності, тобто набір критеріїв, за якими алгоритм зможе визначити, виконується в конкретній одиниці даних шукана закономірність чи ні. Надалі, застосовуючи цю модель уже до нового та випадкового набору даних, програма здатна знайти в ньому ті одиниці даних, у яких закономірність виконується.

За допомогою машинного навчання можна виявляти закономірності, наприклад, у текстах коментарів у соціальних мережах, у численних результатах наукових експериментів або замовленнях, які надходять до складу.

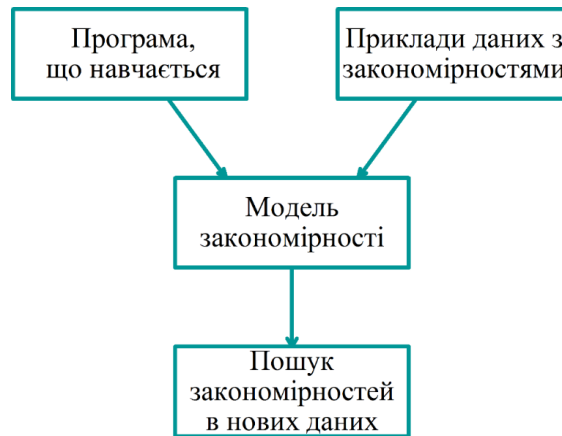


Рис. 6. Алгоритм навчання програми

Інструменти для роботи з Великими даними

Для роботи з Великими даними існує безліч професійних інструментів, які здебільшого є програмними продуктами.

Насамперед це програмне забезпечення призначене для організації розподілених обчислень, зокрема і за моделлю MapReduce. До цієї категорії належить як однойменний продукт від Google, так і проект Hadoop, розроблений компанією Apache Software Foundation. В екосистему Hadoop також входить програмний продукт Spark, який реалізує більш специфічні методи розподілених обчислень, що дають приріст продуктивності в деяких завданнях.

Як альтернатива розгортання власних кластерів для здійснення розподілених обчислень виступають **хмарні обчислення**. Фактично, ця технологія дає змогу «орендувати» обчислювальні потужності у великої компанії та отримувати до них доступ через інтернет, а не купувати комп'ютери за їх повну вартість.

Ще одним важливим інструментом для аналізу Великих даних є різноманітні бібліотеки, що допомагають писати програми, основані на машинному навчанні. Багато таких бібліотек безкоштовні і мають відкритий вихідний код. Велику популярність має розроблена Google бібліотека для мови програмування

Python, що називається TensorFlow. Зараз існують реалізації цієї бібліотеки і для інших мов програмування.

Таргетована реклама на основі аналізу Великих даних

Таргетована (націлена, персоналізована) реклама – це рекламні оголошення, що показуються лише певним учасникам (цільовій аудиторії), згрупованим відповідно до здійснюваних ними дій в інтернеті.

Однак не завжди такі прості факти, як стать, вік тощо, дають змогу точно виявити інтереси і потреби людини. Для цього необхідно скласти модель її особистості. Великі дані є одним із шляхів для виявлення моделі особистості людини, оскільки технології обробки та аналізу великих обсягів інформації дають змогу, зокрема, досліджувати активність людини в соціальних мережах і робити висновки про її психологічні якості. Таке використання Великих даних також називають психометричним аналізом.

Розглянемо одну з найпопулярніших моделей особистості – «Велику п'ятірку», яка також має назву OCEAN. Це аббревіатура, складена з перших букв англійських назв рис характеру, ступінь вираженості яких у людини описує названа модель: відкритість до досвіду (openness to experience), сумлінність (conscientiousness), екстраверсія (extraversion), доброзичливість

(agreeableness), а також нейротизм (neuroticism). Вираженість або невираже-

ність кожної з цих рис певним чином характеризує особистість людини (рис. 7).

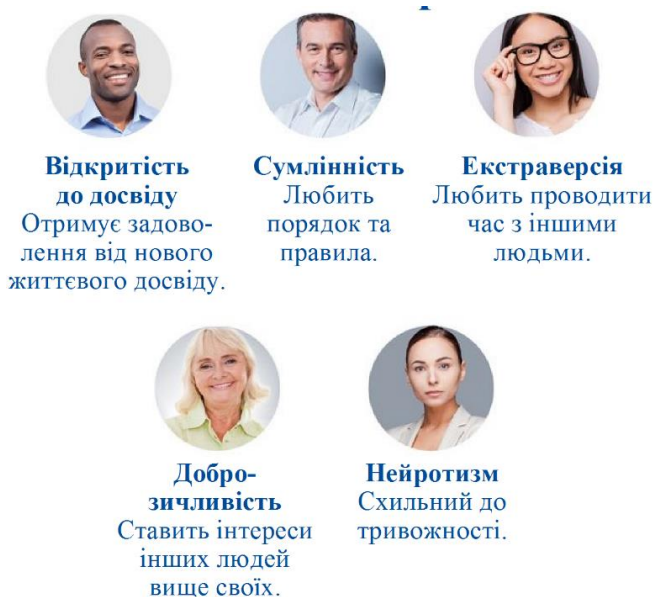


Рис. 7. Риси характеру, що входять у модель особистості «Велика п’ятірка»

Відкритість до досвіду показує, наскільки людина оригінальна, відкрита для будь-яких стимулів, наскільки широке коло її інтересів і наскільки вона готова до ризику.

Сумлінність – це те, наскільки людина обережна, скрупульозна і завзята.

Екстраверсія, або позитивний емоційний настрій, – це риса характеру, завдяки якій людина відчуває позитивні емоції, добре почуває себе в соціумі і думає про оточуючих у позитивному світлі. Екстраверти швидше йдуть на контакт з товаришами по службі. Вони можуть відмінно працювати там, де потрібні часті контакти з людьми, наприклад, у галузі продажу або у сфері обслуговування клієнтів.

Добротливість – це риса, яка ставить людину між тими, хто добре ладить з іншими людьми, і тими, хто ладнає з людьми погано. Добротливість може бути цінною якістю у сферах, де потрібно налагоджувати добрі стосунки з людьми.

На відміну від екстраверсії, нейротизм, або негативний емоційний настрій,

говорить про те, що людина схильна до негативних емоцій, депресії і в цілому сприймає саму себе і оточуючих негативно.

Можна визначити найбільш виражену рису характеру, яка має найсуттєвіший вплив на рішення, які приймає людина, на її поведінку і смаки.

Для виявлення такої риси, а також співвідношення інших рис, можна використати спеціальні опитування. Найбільш відомі такі реалізації «Великої п’ятірки»:

- найбільш поширений та популярний опитувальник NEO PI, який розробляють з 1980-х років американські психологи П. Коста і Р. МакРая (Paul T. Costa Jr., Robert R. McCrae). З 1992 року представлений версіями NEO PI-R (260 питань) і NEO FFI (скорочений, 60 питань);

- IPIP Big-Five Factor Markers (50 і 100 питань), IPIP NEO PI-R (120 і 300 питань) – вільні для некомерційного використання реалізації шкал «Великої п’ятірки» з International Personality Item Pool. IPIP NEO PI-R пропонується як аналог комерційного NEO PI.

Необхідно враховувати, що навіть люди, які ведуть однаковий спосіб життя, можуть мати різні домінуючі риси характеру. Наприклад, люди з однаковим рівнем доходу, що користуються послугами одного і того ж банку, харчуються тільки органічною їжею і читають один і той самий журнал, найбільш вираженою рисою характеру можуть мати як екстраверсію, так і нейротизм. Тому при створенні таргетованої реклами найбільш ефективно буде спиратися саме на риси характеру, а не на поверхневі ознаки і спосіб життя людини.

Використання великих даних у передвиборчій кампанії

Іншою сферою застосування таргетованої реклами, основаної на аналізі Великих даних, є виборча кампанія. Відомо, що Д. Трамп, перемога якого на виборах президента США 2016 року виявилась несподіванкою для багатьох експертів, у своїй передвиборчій кампанії користувався послугами фірми, що займається створенням персоналізованої

реклами на основі результатів психометричного аналізу Великих даних.

Особливістю передвиборчої кампанії Д. Трампа було постійне відстежування змін інтересів електорату, щоб ефективно взаємодіяти з ним за допомогою реклами (рис. 8, а).

Робота з електоратом була безперервним процесом. Проводилися дослідження електорату. За допомогою моделювання він поділявся на різні сегменти і з кожним з цих сегментів велася активна взаємодія за допомогою ефірної та адресної телевізійної реклами, а також через рекламу в інтернеті. При цьому формувалися проміжні звіти як на етапі дослідження, так і на етапі випуску реклами, основаної на цих дослідженнях, які давали змогу відстежувати ефективність агітації.

Дослідження являли собою щотижневе опитування близько 1500 осіб з кожного штату. Опитування проводилися і аналізувалися за принципами поділу на категорії (рис. 8, б).

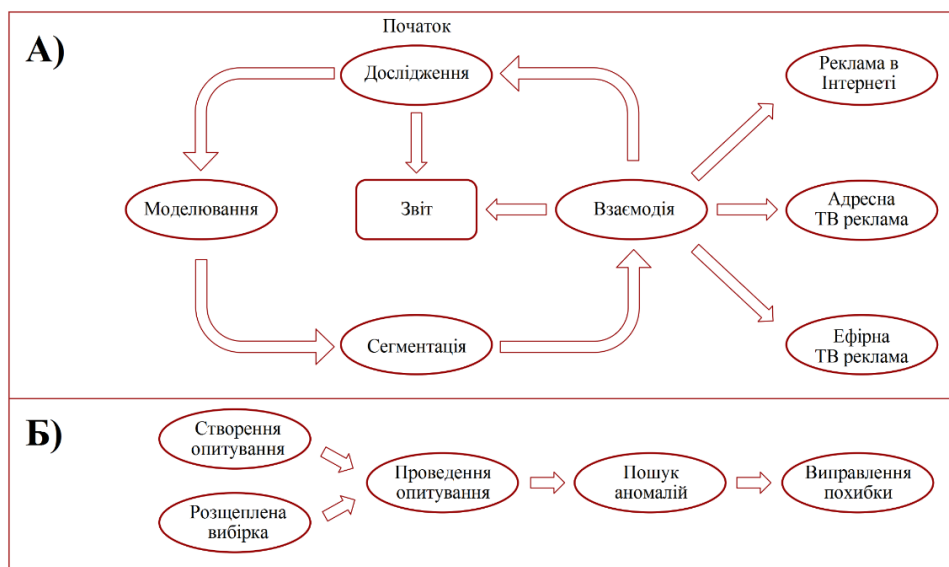


Рис. 8. Робота з електоратом

На основі результатів опитувань формувалися звіти (рис. 9). Вони давали можливість оцінити обсяг електорату, його роздробленість за віком, статтю, етнічною

належністю і релігією. Також визначалися теми, що хвилюють виборців, та ймовірність їх участі в голосуванні.

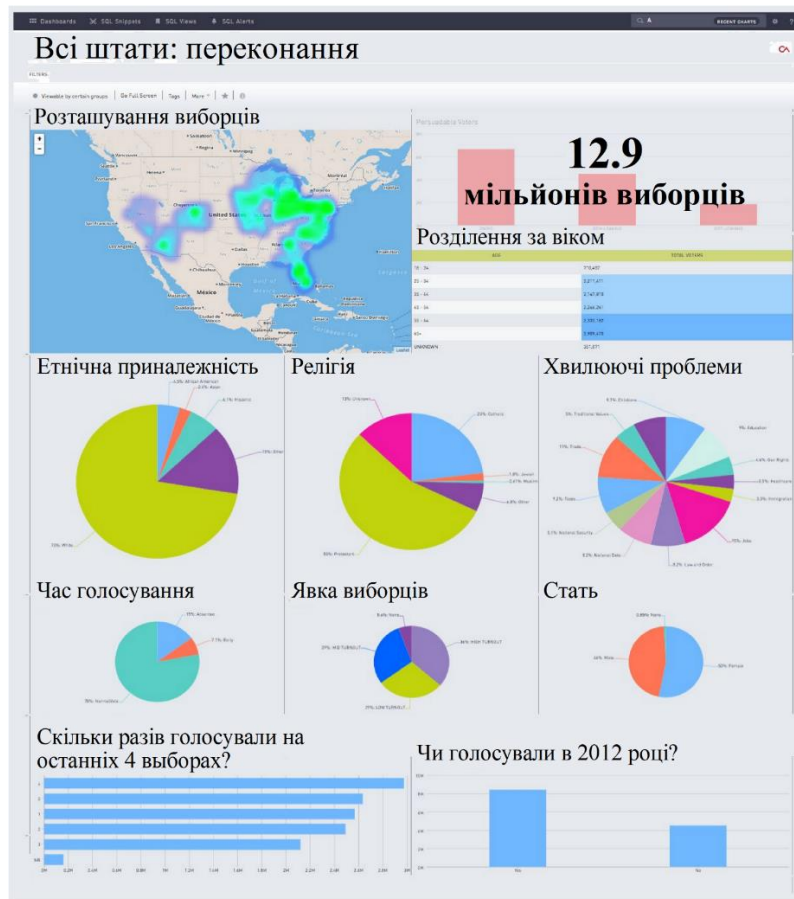


Рис. 9. Обсяг та роздробленість електорату

Для роботи алгоритмів, здатних робити такі висновки, необхідно зібрати «опорний» набір даних, у якому були б приклади відповідностей активності користувача в інтернеті з його політичними поглядами, зокрема опитувань у соціальних мережах.

Ефективна реклама дала змогу, зокрема, зібрати 26,5 млн дол. пожертв, а також 950000 електронних адрес, які в подальшому можливо використовувати для агітації.

Крім того, була проведена серйозна робота щодо підвищення явки на голосуванні, що принесло Д. Трампу додатковий електорат.

Використання штабом Д. Трампа аналізу Великих даних для перемоги на виборах було широко висвітлено провідними американськими ЗМІ (рис. 10), що гово-

рить про визнання ними і всією громадською значущості технології Big Data.

Також існують думки, що компанія, яка працювала зі штабом Д. Трампа, займалася ще й агітацією в рамках референдуму про вихід Великобританії зі складу ЄС, а також впливала на вибори в кількох інших країнах, працюючи над передвиборчими кампаніями місцевих кандидатів.

Безсумнівно, вибори і референдуми є складним механізмом, а їх результат визначається відразу безліччю найрізноманітніших факторів. Однак уже зараз є всі передумови до того, що аналіз великих даних у багатьох країнах незабаром стане такою ж обов'язковою частиною передвиборчої кампанії, як і звичайна реклама на телебаченні або білбордах.

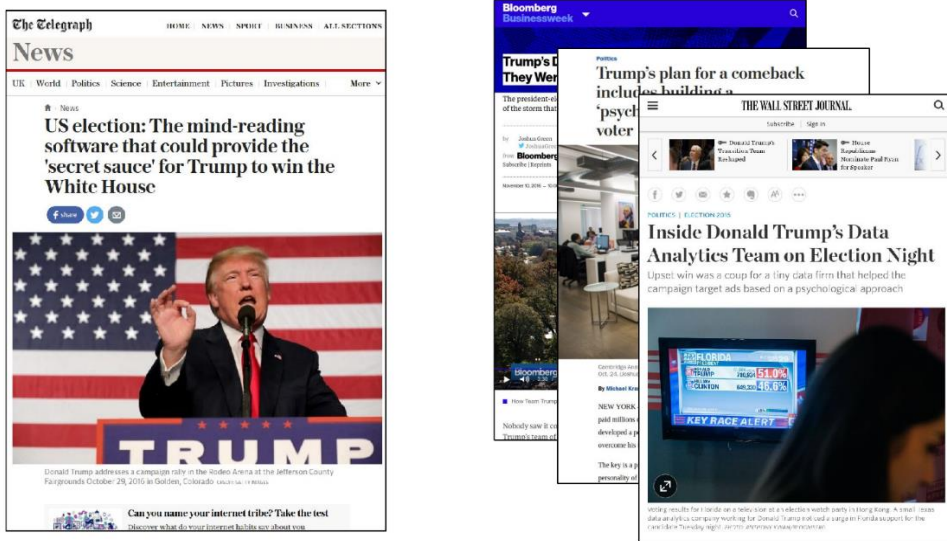


Рис. 10. Освітлення в ЗМІ використання аналізу Великих даних на виборах

Наведемо декілька прикладів втілення принципів Big Data у промисловість та медицину [12, 13].

Union Pacific Railroad – найбільша залізнична компанія США, має більше 8 тис. локомотивів і володіє найбільшою в США мережею залізниць. На днищі кожного состава компанії були встановлені термометри, акустичні і візуальні сенсори та інші датчики. Дані від них передаються в центр обробки волоконно-оптичними кабелями, протягнутими уздовж мережі залізниць. Центр обробки також отримує дані про погодні умови, дані про стан гальмівних та інших систем, GPS-координати составів. Зібрані дані і побудовані на їх основі інтелектуальні моделі дають змогу відстежувати стан коліс і залізничного полотна й передбачати сход составів з рейок за кілька днів або навіть тижнів до можливого інциденту. Цього часу достатньо для того, щоб оперативно усунути проблеми, уникнути пошкоджень состава і затримки інших потягів. У результаті компанії вдалося знизити кількість сходів составів з рейок на 75 % і уникнути значних втрат (раніше втрати від одного сходу з рейок могли досягати 40 млн дол. США).

United Parcel Service (UPS) – американська логістична компанія, найбільша у світі з доставки посилок і управління ланцюгами поставок, доставляє більше ніж 16,9 млн вантажів за день у більш ніж 220 країнах світу. UPS використовує Великі дані для оптимізації маршрутів, зниження витрат палива і навантаження на навколишнє середовище. Компанія застосовує радіолокацію для відстеження вантажів, збирає й аналізує показники безлічі датчиків для контролю стану транспортних засобів та поведінки водіїв, використовує дані мобільних CRM для моніторингу доставки і якості обслуговування клієнтів. Для оптимізації маршрутів і зменшення витрат у компанії впроваджена система ORION – одна з найбільших у світі систем, основаних на результатах математичної теорії дослідження операцій. Побудова оптимальних маршрутів проводиться в реальному часі з використанням величезних обчислювальних потужностей. Для вирішення цього завдання система використовує картографічні дані, дані про пункти відправлення та прибуття, дані про розміри і необхідні терміни доставки вантажів. У результаті економія становить

близько 6 млн л палива на рік, скорочення викидів вуглецю в атмосферу на 13 тис. т щорічно, підвищення швидкості доставки.

ThyssenKrupp AG – один з провідних світових виробників ліфтів, обслуговує більше 1,1 млн ліфтів по всьому світу. У партнерстві з Microsoft компанія запустила систему МАХ, яка за допомогою Інтернету речей збирає дані від безлічі датчиків, установлених у ліфтах компанії (швидкість кабіни, функціонування дверей, температура мотора та ін.) і на цій інформації будує інтелектуальні моделі на платформі Azure Machine Learning. Моделі дають змогу запобігти інциденту до його виникнення і передати техніку конкретний код поломки, один з 400 можливих, щоб зменшити час обслуговування. У результаті зменшуються витрати на обслуговування і ремонт (одна поломка обходиться мінімум в 300 дол. США) і створюється додаткова цінність для клієнтів: ліфти стають більш надійними, безпечними, власники розташованих у будівлях магазинів, готелів та інших організацій не зазнають збитків. Час безперебійної роботи ліфтів виріс у середньому на 50 %.

У порту Гамбурга впроваджена хмарна система Smart Port Logistics, що дає змогу цілодобово стежити за переміщенням вантажівок, яким система підказує оптимальні маршрути залежно від завантаженості трас і наявності паркувальних місць. Зв'язок здійснюється за допомогою мобільного інтернету. Як тільки вантажівки виїжджають з місця завантаження/розвантаження, система

надсилає водієві всю необхідну інформацію про статус прилеглих доріг. Рішення дає змогу розвантажити трафік навколо порту і зменшити час доставки вантажу.

У царині лікування раку, який набуває все більшого розповсюдження, значних успіхів досягла клініка «Шаріте» у м. Берлін. Лікування полягає у використанні маркерів, які точно визначають тип раку в пацієнта, за допомогою принципів Big Data. Відбувається порівняння маркерів визначення раку на підставі аналізів пацієнта з великою кількістю подібних, а також моніторинг їх зміни у часі. У результаті своєчасне діагностування дає змогу вибрати конкретну програму лікування.

Висновки. Розуміння принципів роботи Великих даних і, зокрема, таргетованої реклами корисне для всіх громадян країни. Маючи навіть базове уявлення про ці технології, вони вже не будуть повністю довіряти будь-якій, зокрема політичній, рекламі, розуміючи, що ними можуть маніпулювати, ґрунтуючись на їх персональних даних, отриманих з інтернету.

Застосування принципів Big Data охоплює все більше сфер людського життя, починаючи від реклами, побутової техніки, транспортних систем, логістики, промисловості, і закінчуючи методами лікування та діагностування хвороб. Усе більша кількість транспортного, підйомно-транспортного та складського обладнання оснащується роботизованими системами керування та інтелектуального моніторингу (smart-технологіями).

Список використаних джерел

1. Govindan K., Cheng T.C.E., Mishra N., Shukla N. Big data analytics and application for logistics and supply chain management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2018. Vol. 114. P. 343-349. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.03.011>.
2. Taniguchi E., Thompson R.G., Yamada T. New Opportunities and Challenges for City Logistics. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 12. P. 5-13. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.004>.
3. Zhong R. Y., Huang G. Q., Lan S., Dai Q. Y., Zhang T. New A big data approach for logistics trajectory discovery from RFID-enabled production data. *International Journal of Production Economics*. 2015. Vol. 165. P. 260-272. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.014>.

4. Basole R. C., Nowak M. Assimilation of tracking technology in the supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2018. Vol. 114. P. 350-370. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.08.003>.
5. Govindan K., Soleimani H., Kannan D. Reverse logistics and closed-loop supply chain: a comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*. 2015. Vol. 240. Issue 3. P. 603-626. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>.
6. Grigorov O. V., Svirgun V. P. Improving the productivity of utility cranes through optimum motion control. *Soviet machine science*. 1986. Issue 6. P. 25-29.
7. Okun A., Los Y. The controllability function method. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 78. Issue 3. P. 3-8.
8. Grigorov O., Druzhynin E., Anishchenko G., Strizhak M., Strizhak V. Analysis of various approaches to modeling of dynamics of lifting-transport vehicles. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7. Issue 4. P. 64-70.
9. Матеріали конференції IT Weekend Ukraine 2018-09-08, Київ, Україна. URL: <https://itweekend.events/event/it-weekend-ukraine-2017/>.
10. Матеріали конференції IT Weekend Ukraine 2017-10-09, Київ, Україна. URL: <https://itweekend.events/event/it-weekend-ukraine-2018/>.
11. Григоров О. В., Аніщенко Г. О., Стрижак В. В. Техніка матеріальних потоків логістичних систем: навч. посібник. 2-ге вид., допов. і виправл. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. 496 с.
12. Гришина А. 12 кейсов по биг дате: подтвержденные примеры из индустрии, когда биг дата приносит деньги. *habr*, 2016. URL: <https://habr.com/ru/company/newprolab/blog/314926/> (дата звернення : 10.03.2019).
13. Тоскин А. Большие грузы – Большие Данные. Big Data для транспортно-логистических узлов. *Логистика и управление цепями поставок*. 2015. № 1 (66). С. 77–79.

Григоров Отто Володимирович, д-р. техн. наук, професор кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання Національного технічного університету «ХПІ». Тел. (057) 707-65-82. E-mail: ottow@kpi.kharkov.ua.

Аніщенко Галина Оттівна, канд. техн. наук, доцент кафедри теоретичної механіки Національного технічного університету «ХПІ». E-mail: gala_grigorova@ukr.net.

Стрижак Всеволод Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання Національного технічного університету «ХПІ». E-mail: stryzhak.vsevolod@gmail.com.

Петренко Надія Олександрівна, канд. техн. наук, професор кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання Національного технічного університету «ХПІ». E-mail: nadezhdapetrenko53@gmail.com.

Турчин Ольга Володимирівна, канд. техн. наук, асистент кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання Національного технічного університету «ХПІ». E-mail: feathven@gmail.com.

Окунь Антон Олександрович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання Національного технічного університету «ХПІ». E-mail: okunanton@gmail.com.

Grygorov Otto, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Lifting and Transporting Machines and Equipment, National Technical University “KhPI”. Tel. (057) 707-65-82. E-mail: ottow@kpi.kharkov.ua.

Anischenko Galyna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Theoretical Mechanics, National Technical University “KhPI”. E-mail: gala_grigorova@ukr.net.

Stryzhak Vsevolod, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Lifting and Transporting Machines and Equipment, National Technical University “KhPI”. E-mail: stryzhak.vsevolod@gmail.com.

Petrenko Nadiia, PhD (Tech.), Professor, Department of Lifting and Transporting Machines and Equipment, National Technical University “KhPI”. E-mail: nadezhdapetrenko53@gmail.com.

Turchyn Olha, PhD (Tech.), Assistant, Department of Lifting and Transporting Machines and Equipment, National Technical University “KhPI”. E-mail: feathven@gmail.com.

Okun Anton, PhD (Tech.), Senior Lecturer, Department of Lifting and Transporting Machines and Equipment, National Technical University “KhPI”. E-mail: okunanton@gmail.com.

Статтю прийнято 06.03.2019 р.

УДК 656.225:629.21

УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗЕРНОВИХ ВАНТАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИМИ СТУПІНЧАСТИМИ МАРШРУТАМИ

Асп. Д. В. Арсененко

METHODS OF INFRASTRUCTURE MANAGEMENT FOR OPTIMIZATION OF GRAIN TRANSPORT ORGANIZATION.

Postgraduate student D. V. Arsenenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176419>

Розроблено модель та визначено основні принципи у формуванні відправок та організації руху зернових вантажів. Проаналізовано основні тенденції в розвитку ринку зернових вантажів та виявлено ключові фактори ринку, що дають змогу мати короткостроковий прогноз щодо тенденції перевезення. Запропоновано модель формування ступінчастого маршруту з урахуванням особливостей роботи тягового апарату дільниці та принцип розподілення рухомого складу в умовах реформування галузі.

Ключові слова: логістична модель, розподіл рухомого складу, формування відправки, оператор інфраструктури.

The analysis of the railway freight sector in recent years has set a clear trend towards the development of the oil and grain goods transportation. The growth dynamics in the agrarian sector is positive with a growing sum due to the technological development of the industry and the demand for the world market. Taking into account the geographical, normative and legal component of the agricultural transport sector, the railway becomes a key player in this direction. Paying attention to it and to the particular features of grain and oil cargo exports, the industry must meet modern criteria of service and service quality. Due to lack of locomotive traction, lack of a proper investment market, there is a problem of introducing relevant innovations in the formation of the grain cargoes exports logistics. For the last freight year, the price of domestic corn on the world market, according to the expert estimates, was 18 % lower than the world average.

Separately, there is a question of forming the wagon shipments of this group of goods. The analysis of the loading capacity of the eastern Ukrainian stations by grain goods at the end of 2018 clearly demonstrates the railways inability to provide the transportation demand for the whole number of shippers with small and medium cargo volumes. This situation creates accumulating and freezing of funds, that makes it impossible to develop the entire business sector and gives a negative assessment of the industry as a whole in the conditions of its investment necessity.

The model is developed and the basic principles of forming the stage routes and organizing the movement of grain cargoes are defined. The main trends of the grain cargoes market development are analyzed and key market factors that allow to have a short-term forecast on the transportation tendency are revealed. The model of forming the stage route with the peculiarities of the traction apparatus work of the division and the principle of rolling stock distribution in terms of industry restructuring are proposed.

Keywords: logistic model, distribution of rolling stock, formation of shipment, infrastructure operator, optimal consignment.

Вступ. Останні тенденції в розвитку ринку зернових та олійних вантажів є найбільш прогресуючими й визначальними в розвитку економіки країни. Широкий спектр надання логістичних та організаційних послуг з усього кола питань, пов'язаних із експортом вищевказаних вантажів, зобов'язує перевізника організувати оптимальні умови перевезення із отриманням найбільш ефективних якісних показників.

Постановка задач у загальному вигляді, її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Ключовим завданням є забезпечення перевізника якісною послугою залізничного транспорту згідно з вимогами Закону України «Про залізничний транспорт» [1], створення умов для підтримання інвестиційної програми та формування плацдарму інвестиційної складової. Ускладнює забезпечення надання якісних послуг залізниці дефіцит зерновозів на фоні збільшення обсягів вантажу за рахунок розвитку сільськогосподарської галузі в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зважаючи на постановку задачі в контексті реформування галузі, слід розглянути питання транспортно-експедиційного обслуговування [2] зернових вантажів та розуміння терміну

«перевізник» [1, 3], питання формування принципів організації роботи вагонів різних форм власності та їх розподілення на ринкових принципах [4]. Перевезення зернових та олійних вантажів має в собі цілу низку питань щодо взаємодії із переробними підприємствами, з іншими видами транспорту, інтеграцію в міжнародну транспортну мережу та використання інформаційних технологій в організації процесу перевезень.

Визначення мети та задачі дослідження. Створення моделі формування відправок зернових вантажів на принципах ресурсозбереження:

- скорочення порожнього пробігу та швидкості доставки вантажу в порт;
- утворення єдиного інформаційного поля для всіх учасників перевезення;
- формування умов для недискримінаційного доступу до рухомого складу, засобів та місць навантаження;
- підтримка аграрного сектора в темпах зростання обсягів експортування вантажів сільськогосподарського походження.

Тенденція розвитку обсягів перевезення зернових вантажів за останні роки має позитивну динаміку і повинна мати коректне відображення в рішеннях оператора інфраструктури (рис. 1).

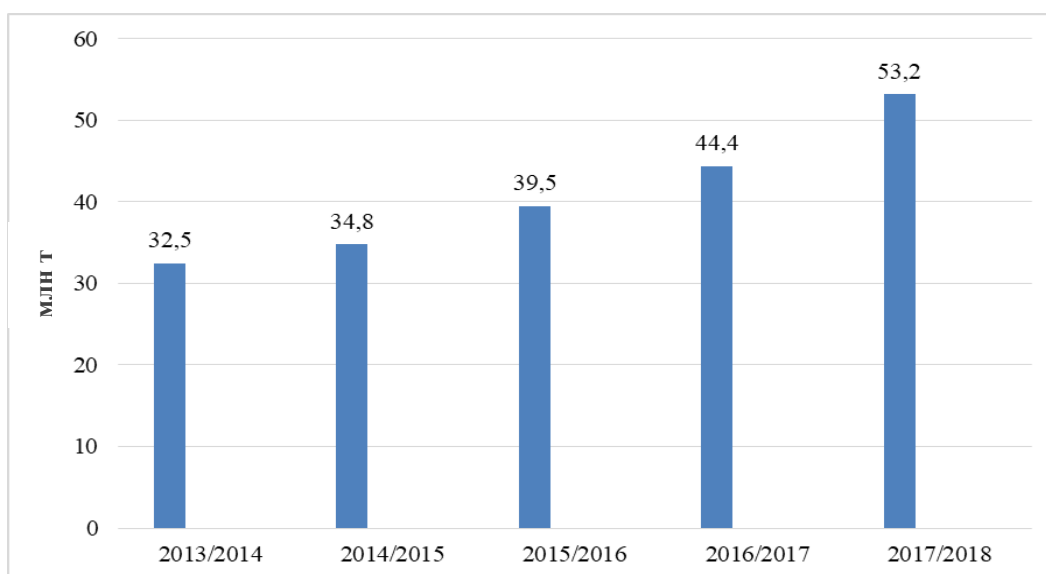


Рис. 1. Динаміка обсягів перевезення зернових вантажів залізничним транспортом

Структура ринку перевезення з об'єктивних причин має сезонні коливання і в пікові етапи оператор інфраструктури не в змозі на належному рівні виконати вимоги заявника щодо забезпечення його рухомим складом. Термін експлуатації близько третини вагонів зерновозів добігає свого терміну, а, зважаючи на ситуацію в цілому, залучення великих інвестицій потребує певного часу.

На сьогоднішній день підприємства-переробники зернових вантажів (елеватори) не у повному обсязі відповідають вимогам сьогодення щодо якості надання послуг та економічної складової [5]. Саме тому ми маємо тенденцію створення нових відправних точок зернових вантажів на об'єктах інфраструктури, що у свою чергу в подальшому залучить до перевезення ще більше експедиторів та власників рухомого складу.

Зважаючи на вищесказане, першочерговим завданням є створення нової моделі відносин між учасниками перевезень на базі моделі формування відправок зернових вантажів.

Основна частина дослідження. На сьогоднішній день одним із ключових факторів, що впливає на динаміку розвитку вітчизняної економіки, є перевезення зернових вантажів. Пункти вантажоутворення цього сегмента розташовані майже на всій території країни, що надає поставленому питанню особливої актуальності. Особливістю ринку перевезень зернових вантажів є залежність від багатьох зовнішніх факторів. Оператор інфраструктури, враховуючи динаміку розвитку галузі перевезень, повинен реагувати на ці зміни в режимі он-лайн (рис. 2). В результаті процес перевезення зернових вантажів набуває певних недоліків, пов'язаних із простим рухомим складом як у порожньому, так і в навантаженому стані, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат.

Розглянемо ситуацію із навантаженням зернових вантажів у період із червня по грудень 2017 року на

конкретній дільниці Харківської дирекції залізничних перевезень (рис. 3).

Аналіз помісячного навантаження зернових вантажів по дільниці за досліджуваний період має рівномірний характер із коефіцієнтом нерівномірності на рівні 0,2 (рис. 4). Виняток становить період із серпня по вересень, що обумовлено збиранням урожаю соняшника, сої, кукурудзи тощо. Якщо врахувати коефіцієнт нерівномірності, обсяги навантаження на дільниці та норму маршруту на дільниці за 50 ваг, маємо середній час на його формування близько 4 діб. При формуванні будь-яких рішень щодо оптимізації перевезення зернових вантажів слід враховувати природу вантажоутворення в сучасних умовах. Ця номенклатура вантажів є невід'ємною складовою у формуванні глобальних економічних закономірностей, тому, окрім сезонних коливань, пов'язаних із об'єктивними природними факторами, слід враховувати зовнішні фактори, договірні зобов'язання трейдера та експортера, курси коливання валют тощо.

Ключовими аспектами при формуванні маршруту є виконання умов, за рахунок реалізації яких може існувати такий варіант перевезення, а саме:

- скорочення експлуатаційних витрат оператора інфраструктури в процесі перевезення за рахунок проходження технічних та дільничних станцій без переробки;

- скорочення часу обігу вагона за рахунок зменшення технологічних операцій на шляху прямування;

- можливість у подальшому використовувати створений маршрут для подачі на іншу дільницю за необхідності.

Географічний аналіз пунктів вантажоутворення, технологічні можливості опорних станцій, сортувальні можливості припортового регіону та кількість основних портів дають змогу запропонувати технологічну карту маршрутної відправки зернових вантажів, наведену на рис. 5.



Рис 2. Учасники перевізного процесу з погляду їхніх прав та зобов'язань у результаті реформування галузі

Зважаючи на вищесказане, при більш детальному прогнозуванні обсягів перевезення зернових вантажів у конкретний проміжок часу слід урахувати не потужність станцій формування вантажу чи будь-які інші фактори, а конкретні заявки вантажовідправників.

Зупинимось на двох основних варіантах формування маршрутної відправки:

1) ступінчастий маршрут із формуванням партії вантажу на залізничній дільниці та подальшим розпиленням у припортовому районі;

2) ступінчастий маршрут із формуванням партії вантажу на станції, яка за своїм технологічним призначенням є пунктом концентрації (маршрутною базою) з подальшим розпиленням у припортовому районі.

Технологія формування 1-го варіанта має бути пов'язана із роботою дільничного локомотива [6]. Ураховуючи тенденції реформування галузі, на маневровому локомотиві повинні бути складач поїздів та

комерційний агент, що дасть змогу приймати вантаж до перевезення як у технічному, так і в комерційному складі. Створення перевізного документа та інші інформаційні операції з вагоном виконують працівники товарної контори. Колійний розвиток станцій вантажоутворення за потреби дає змогу накопичувати маршрут, що дає додаткові варіанти оптимально організувати роботу станційного та дільничного локомотива.

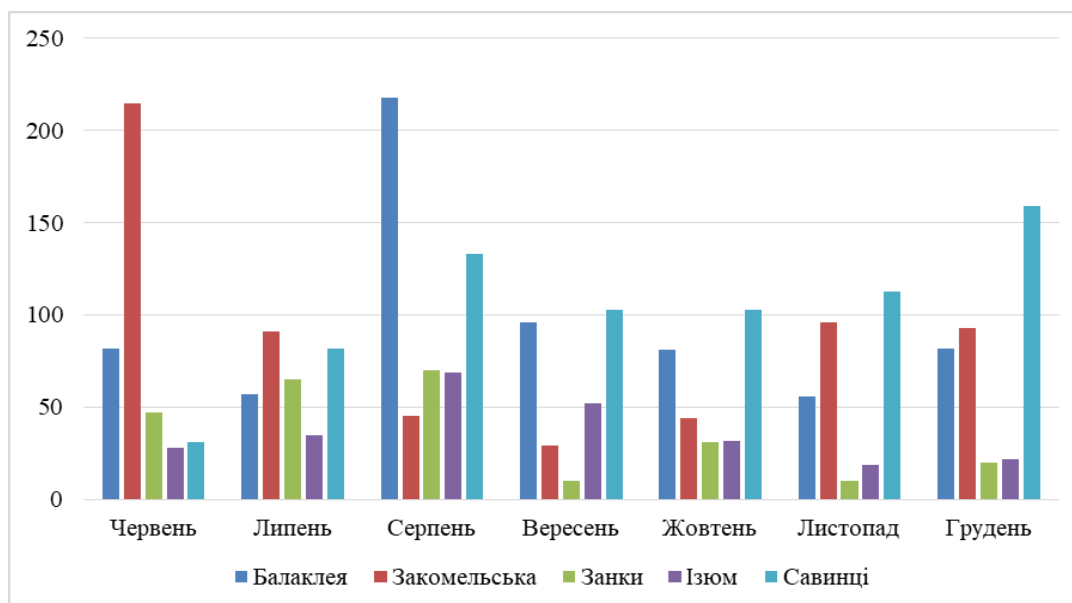


Рис 3. Навантаження зернових вантажів за звітний період по станціях

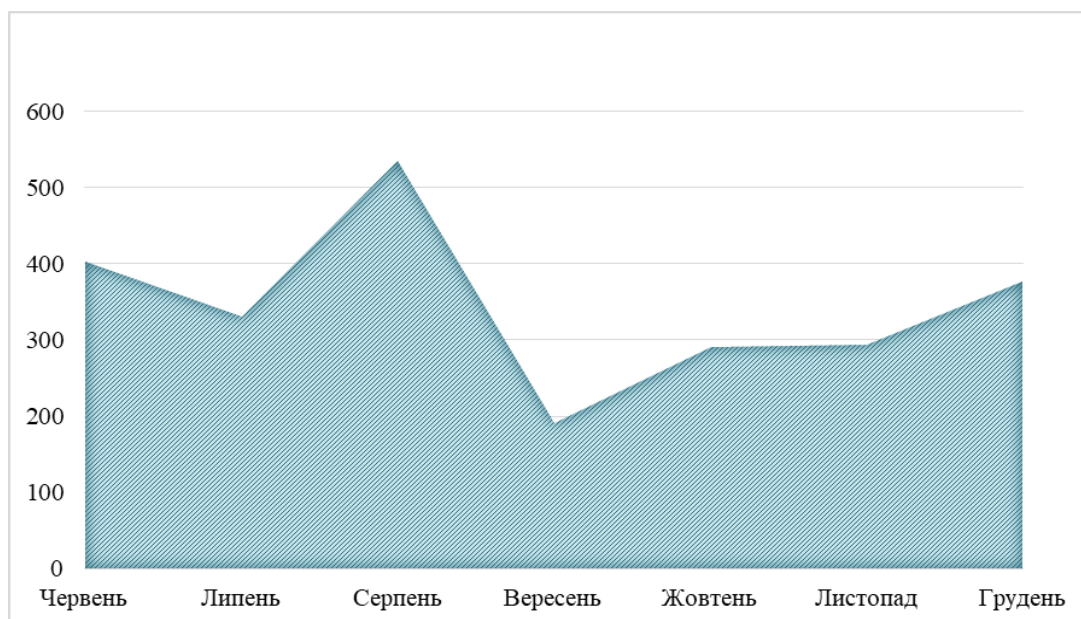


Рис. 4. Навантаження зернових вантажів за звітний період помісячно

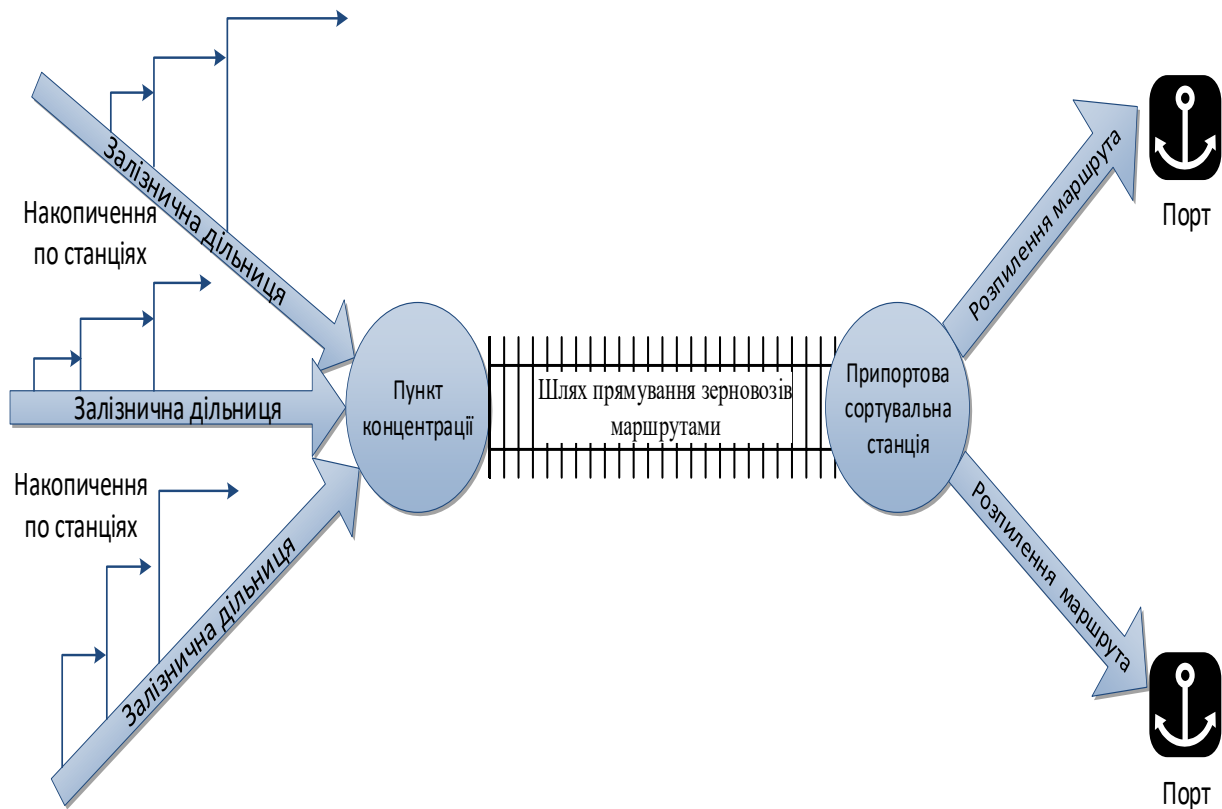


Рис. 5. Схема формування маршруту із зерновозів на пункті концентрації вантажної роботи із подальшим розпиленням до портів

Якщо обсягів для формування маршруту на залізничній дільниці недостатньо, слід розглянути 2-й варіант із формуванням маршруту на опорній станції (яка за своїм функціоналом може бути технічною станцією). У такому разі слід аналізувати технологічні особливості кожного варіанта накопичення окремо і формувати маршрут із двох або більше дільниць.

Ключовим у вирішенні поставленого питання є створення моделі оптимального планування формування маршруту зернових вантажів з визначенням таких технологічних параметрів:

- кількість вагонів у маршруті q ;
- термін часу на його накопичення t ;
- визначення меж, для яких буде оптимальним таке перевезення, з

урахуванням відстані від станції розпилення та кількості технічних станцій.

Проаналізувавши показники вантажної роботи на конкретній дільниці, постає питання доцільності створення моделі перевезення зернових вантажів на базі ступеневого маршруту із накопиченням. Ключовими питаннями при побудові такої моделі буде визначення оптимальної кількості вагонів у маршруті, враховуючи сезонні коливання цього сегмента, визначення необхідної кількості заявок на перевезення по цій дільниці та створення безпосередньо цільової функції експлуатаційних витрат.

Витрати при формуванні маршрутної відправки складаються із нижченаведених компонентів.

Загальні витрати при накопиченні маршруту

$$C_1 = (C'_x + Z'_T) \cdot t_{qi}, \quad (1)$$

де m – кількість станцій на дільниці;
 q^i – розмір партії вантажу на i -й станції, т;
 t_{qi} – час простою вагонів під накопиченням на маршрут по i -й станції, год;
 q_{st} – статичне навантаження, для зернових вантажів прийнято 68 т/ваг;
 C'_x – експлуатаційна питома вартість простою одного вагона вантажу під очікуванням накопичення на маршрут, грн/ваг.год;
 Z'_T – питома вартість простою одного вагона вантажу під очікуванням накопичення на маршрут для відправника, грн/ваг.год.

Експлуатаційні витрати при навантаженні

$$C_2 = \frac{q_x}{Q_c} \cdot C'_x + C_T, \quad (2)$$

де C_T – експлуатаційні витрати при навантаженні за тону, грн/ваг ;
 Q_c – переробна спроможність фронтів станції, т/год;
 q_x – розмір партії вантажу у маршруті, т.

Витрати на логістичну та інформаційну складову при формуванні маршруту

$$C_3 = \frac{f_{arm} \cdot t_{qi} \cdot q_{st}}{q_x}, \quad (3)$$

де f_{arm} – експлуатаційні витрати на утримання АРМ за годину з урахуванням фонду заробітної плати, грн/год.

Експлуатаційні витрати при формуванні маршруту із доставкою на опорну станцію

$$C_4 = \frac{\sum_{i=1}^m (C_m + C_{zp}) \cdot t_i}{q_x} \cdot q_{st}, \quad (4)$$

де C_m – вартість локомотиво-години маневрової роботи, грн/год;
 C_{zp} – фонд заробітної праці працівників комерційного цеху та цеху руху, грн/год;
 t_i – загальний час роботи маневрового локомотива по i -й станції дільниці, год.

Експлуатаційні витрати при вивантаженні

$$C_5 = \frac{C_T'' \cdot q_x}{Q_p}, \quad (5)$$

де C_T'' – експлуатаційні витрати при вивантаженні за годину, грн/год;
 Q_p – можлива переробна спроможність порту, т/год.

Логістичні витрати на раціональний розподіл порожнього рухомого складу для формування маршруту (згідно з тарифною схемою № 14.2 ТР № 1 [7]). Ураховуючи залежність витрат від багатьох зовнішніх факторів, у розрахунках використано результат апроксимації тарифної схеми у вигляді степеневі функції

$$C_6 = n^{1/n} \cdot f_{log}, \quad (6)$$

де f_{log} – витрати на підсилку групи порожнього рухомого складу згідно з ТР № 4, грн. Так, тенденція формування витрат на підсилку становить при $n=5$ – 494 грн, при $n=4$ – 482 грн, при $n=3$ – 473 грн;

n – кількість груп порожніх вагонів, з яких формується маршрут з урахуванням логістики підсилки порожнього рухомого складу. Величина цього показника встановлена шляхом аналізу роботи декількох дільниць Харківської дирекції залізничних перевезень.

Витрати на зберігання вантажу в очікуванні вивантаження в порту

$$C_7 = \left(\frac{C_{xm} + Z_T}{q_x} \right) \cdot t_x \cdot q_{st}, \quad (7)$$

де t_x – час простою маршруту на станції вивантаження, год;

C_{xm} – експлуатаційна питома вартість простою маршруту в очікуванні на станції вивантаження, грн/год;

Z_T – питома вартість простою маршруту в очікуванні вивантаження для відправника, грн/год.

Експлуатаційні витрати на станції призначення, урахувавши особливості відправки:

$$C_8 = \frac{(C_m + C_{zp}) \cdot t_{mv}}{q_x} \cdot q_{st}, \quad (8)$$

де t_{mv} – загальний час роботи маневрового локомотива на станції вивантаження.

Таким чином, цільова функція моделі перевезення зернових вантажів маршрутами із накопиченням має вигляд

$$C = \sum_{i=1}^8 C_i \Rightarrow \min. \quad (9)$$

У явному вигляді модель із системою обмежень, що забезпечує виконання технічних, технологічних, логістичних і правових умов, має такий вигляд:

$$C(q) = \sum_{i=1}^8 c_i = (c'_x + Z'_T) \cdot t_{qi} + \frac{q_x}{Q_c} \cdot c'_x + C_T + \frac{f_{arm} \cdot t_{qi} \cdot q_{st}}{q_x} + \frac{\sum_{i=1}^m (C_m + C_{zp}) \cdot t_i}{q_x} \cdot q_{st} + \frac{C_T'' \cdot q_x}{Q_p} + n^{1/n} \cdot f_{iog} + \left(\frac{C_{xm} + Z_T}{q_x} \right) \cdot t_x \cdot q_{st} + \frac{(C_m + C_{zp}) \cdot t_{mv}}{q_x} \cdot q_{st} \Rightarrow \min \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{\min} \leq q \leq q_{\max} - \text{партія вантажу не повинна перевищувати максимально - допустиму вагову норму щодо вантажних поїздів на даному напрямку } q_{\max} \\ q_{\min} - \text{відповідна мінімальна вагова норма, } q_{\min} = q_{ct} \\ \frac{q}{Q_{\Pi}} + t + T_{\text{пер}} \leq T_{\text{норм}} \end{array} \right.$$

Графічне відображення поверхні відгуку моделі (10) процесу формування ступінчастого маршруту на умовній дільниці наведено на рис. 6.

Ураховуючи всі вищенаведені складові та принципи формування маршруту, маємо графічне відображення цільової функції, яке зображено на рис. 7. Зважаючи на графічний результат, оптимальна кількість вагонів у маршруті становить близько 30, а тенденція до зростання портових витрат починається з 50. Така ситуація дає змогу формувати маршрут з урахуванням оперативної

ситуації та враховувати технологічні обмеження конкретної відправки.

Висновки. Запропонований підхід до формування ступінчастих маршрутних відправок зерна враховує інтереси всіх учасників перевезення, що є особливо актуальним в інтегруванні транспортної галузі до ринкових реалій сьогодення. Урахування такого показника, як питома вартість простою однієї тонни вантажу в очікуванні вивантаження для відправника Z_T зможе наочно демонструвати значення результату впровадження логістичних рішень у перевезення зернових вантажів

протягом усього перевезення. Організацію перевезення зернових вантажів залізничними ступінчастими маршрутами вперше запропоновано удосконалити за рахунок використання сучасної технологіко-економічної моделі. Головні її ознаки полягають у створенні справедливих технологічних умов формування ринку перевезень зернових вантажів, де ключову

роль відіграє оператор інфраструктури. Керуючись цими принципами, залізниця має змогу оптимізувати експлуатаційні витрат за рахунок скорочення простою під вантажними операціями, терміну доставки вантажу. Подальше використання цього підходу полягає у його впровадженні до інформаційно-керуючих систем.

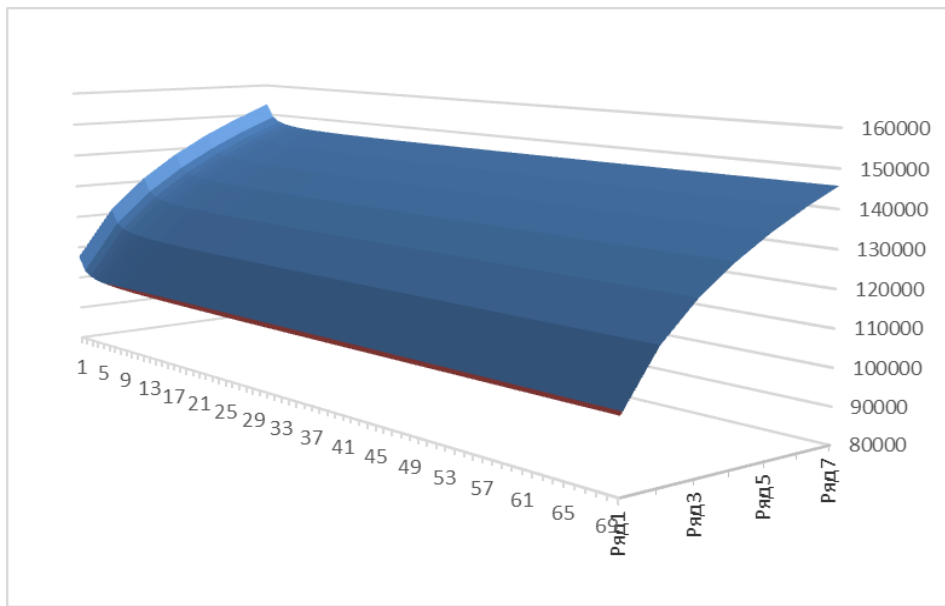


Рис. 6. Двовимірне відображення залежності кількості вагонів у маршруті до вартості їх перевезення

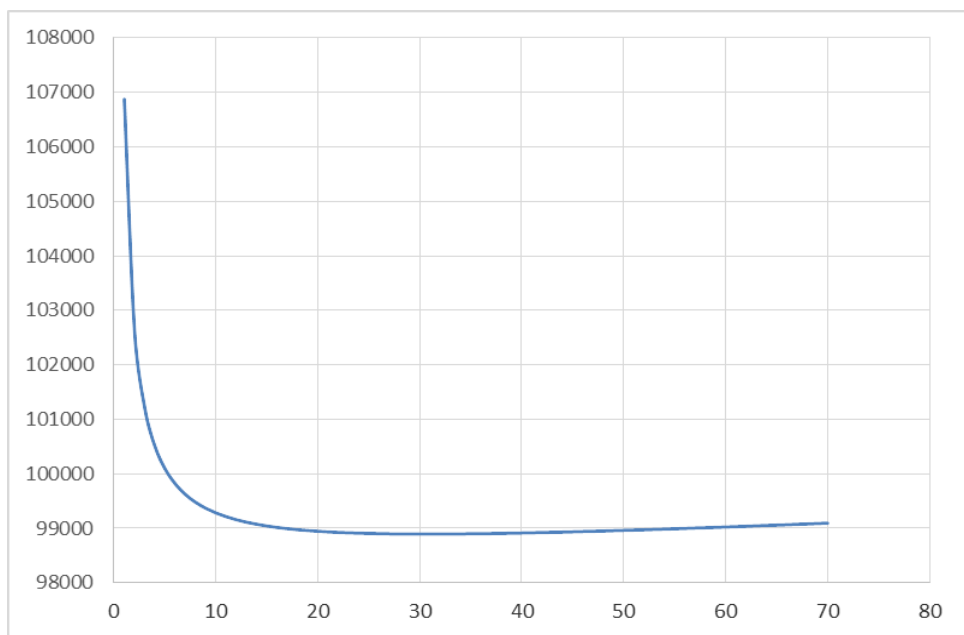


Рис.7. Пошук раціонального складу ступінчастого залізничного маршруту

Список використаних джерел

1. Про залізничний транспорт: Закон України введ. в дію Постановою Верховної Ради України 04.07.1996 р. за № 273/96 (із змінами та доповн.). URL: <http://zakon3.rada.gov.ua> (дата звернення: 06.01.2018).
2. Ломотько Д. В. Розробка технології формування гнучкої системи транспортно-експлуатаційного обслуговування залізницями. *Зб. наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2004. Вип 57. С. 52–57.
3. Про затвердження Статуту залізниць України. Постанова Кабінету Міністрів України; Статут від 06.04.1998 № 457 (із змінами та доповненнями станом на 03.12.2015р.). URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/card> (дата звернення: 18.01.2018).
4. Danny Schipper, Lasse Gerrits, Differences and similarities in European railway disruption management practices. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2016. pp. 42–55. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.12.003>. (last access: 05.07.2018).
5. Ricardo García Ródenas, José Carlos García García, María Luz López García, Commercial actions management for railway companies. *Transportation Research Procedia*. 2017. P. 1250–1255. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.152>. (last access: 06.06.2018).
6. Ломотько Д. В. Розробка моделі функціонування пункту концентрації комерційної роботи в умовах реструктуризації залізничного транспорту. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2013. Вип. 142. С. 19–23.
7. Збірник тарифів на перевезення вантажів у межах України та пов'язані з ними послуги. Тарифне керівництво № 1. (Із змінами від 22.12.2017 р.). URL: <https://www.uz.gov.ua/cargo>. (дата звернення: 18.11.2018).

Арсененко Данило Володимирович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (050) 155-26-74. E-mail: arsenenkodanil@gmail.com.

Arsenko Daniil Vladimirovich, postgraduate student, Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (050) 155-26-74. E-mail: arsenenkodanil@gmail.com.

Статтю прийнято 19.03.2019 р.

УДК 625.143

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ РЕЙОК НА ЛІНІЯХ ХАРКІВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ

Кандидати техн. наук В. Г. Вітольберг, Д. О. Потапов, А. С. Малішевська,
асист. Н. О. Муригіна

ANALYSIS OF OPERATIONAL STABILITY OF THE RAYO ON THE LINES OF THE KHARKOV METROPOLITEN

PhD (Tech.) V. H. Vitolberh, PhD (Tech.) D. O. Potapov, PhD (Tech.) A. S. Malishevskaya,
assistant lecturer N. O. Muryhina

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176427>

Статтю присвячено формуванню статистичної бази з метою дослідження факторів, які негативно впливають на технічний стан рейкових ліній. Це необхідно для підвищення безпеки руху і пошуку напрямків зменшення витрат на утримання ліній метрополітену. Формування статистичної бази виконувалося за даними експлуатації трьох головних колій Харківського метрополітену, розгорнута довжина яких складає 74,6 км. Головним показником для визначення терміну служби рейок прийнято було значення пропущеного тоннажу.

Ключові слова: метрополітен, колія, дефекти рейок, вихід рейок, статистична база, план колії.

The article is devoted to the formation of a statistical base for the study of factors that negatively affect the technical state of the rail lines. This is necessary to improve the safety of the movement and to find directions for reducing the cost of maintaining the subway lines. The formation of the statistical base was carried out according to the data of operation of the three main roads of the Kharkiv subway, the length of which is expanded 74.6 km. The main indicator for determining the service life of the rails was the value of the missing tonnage.

It is clear that in this case, it is particularly important to seek methods that reduce the cost of maintaining lines for the possibility of subway operation under conditions of limited resources.

The analysis of damage and deflection rails was performed on the basis of data on the output of rails on all lines of the Kharkiv Metro.

Particularly important is the need to find methods that can reduce the cost of the current maintenance of railways for the possibility of subway operation under conditions of limited resources.

The basis of the research was the results of many years of observations on the work of the rails on the way, numerical studies of the dynamics of the interaction of the path and rolling stock in the metro

One of the ways to reduce the cost of maintaining subway lines is to further explore the factors that negatively affect the life of rails and the development of measures that prevent it.

These studies allowed establishing the main types of defects rails. Their changes depend on the curvature of the sites, and the changes in these defects over time. The data on the distribution of the rails output in the periods 1986-2001 and 2005-2011 as a whole by subway depending on the track plan was obtained.

In the article an analysis is made which points to the actual problem, namely, the defeat of defects of the contact-fatigue origin of the tracks.

Keywords: *underground, track, deflection rails, rail rails, statistical base, track plan.*

Вступ. Особливістю метрополітену як міського пасажирського залізничного транспорту є масовість, регулярність і безпека перевезень. Це вигідно відрізняє його від інших видів міського транспорту.

Враховуючи це, на Харківському метрополітені триває створення нових і розвиток вже існуючих ліній, незважаючи на складні економічні умови.

Цілком зрозуміло, що при цьому особливо важливим стає пошук методів, які надають змогу зменшити витрати на утримання ліній для можливості функціонування метрополітену в умовах обмежених ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням термінів служби рейок та виникнення дефектів в умовах метрополітену приділяється увага як в Україні [1–4], так і за кордоном [5], однак для дещо іншої постановки завдання.

Визначення мети та завдання дослідження. Один із напрямків зменшення витрат на утримання ліній метрополітену полягає в додатковому дослідженні факторів, які негативно впливають на термін служби рейок, і розробленні заходів, що запобігають цьому.

Але для цього потрібна відповідна статистична база.

Основна частина дослідження. Дослідження виконувалися на базі даних експлуатації трьох головних колій Харківського метрополітену, розгорнута довжина яких складає 74,6 км. Для скорочення назвемо ці лінії: «Х», «С» і «О».

Загальна розгорнута довжина цих колій складає 74,6 км.

Ширина колій на прямих ділянках та у кривих за радіусом від 400 м складає 1520 мм [6, 7].

На коліях застосовуються рейки типу Р-50, переважна більшість яких виготовлена на металургійному комбінаті «Азовсталь» мартенівським способом.

Як підрейкові опори у тунелях використовуються дерев'яні шпали, а на станціях – дерев'яні напівшпали. Епюра шпал – 1680 шт/км на прямих, та 1840 шт/км – у кривих ділянках колії.

Відомо, що основним показником для визначення терміну служби рейок прийнято значення пропущеного тоннажу [8, 9]. При досягненні його нормативного значення має проводитися суцільна заміна рейок відповідно до табл. 1.

Таблиця 1

Періодичність заміни рейок від пропущеного тоннажу

План лінії	Пропущений тоннаж для рейок Р50, млн т бруто
Прямі та криві радіусом 1001 м і більше	550
Криві радіусом 1000–801 м	500
Криві радіусом 800–651 м	450
Криві радіусом 650–501 м	400
Криві радіусом 500–351 м	325
Криві радіусом менше 350 м	250

З метою підвищення надійності колії та безпеки руху поїздів до кожного значення пропущеного тоннажу (див. табл. 1) запропоновано відповідну умову експлуатації для рейок типу Р50 – сумарний вихід рейок (шт/км), який не має перевищувати відповідних норм (табл. 2).

Аналіз пошкоджень та дефектів рейок виконувався на підставі даних щодо виходу рейок по всіх трьох лініях метрополітену (Х), «С» і «О»), які було зібрано за два періоди:

перший – з 1986 р. по 2001 р., масив даних склав 632 рейки;

другий – з початку 2005 року по березень 2011 р., масив даних склав 763 рейки.

Тому загальний масив даних про вихід рейок для статистичної обробки склав 1395 рейок.

Дані про розподіл виходу рейок у періоди 1986–2001 і 2005–2011 рр. у цілому по метрополітену залежно від плану колії наведено, відповідно, в діаграмах (рис. 1, 2).

Таблиця 2

Норми виходу рейок Р50 залежно від плану лінії метро

План лінії	Вихід рейок Р50, шт/км
Прямі та криві радіусом 1001 м і більше	4–6
Криві радіусом 1000–801 м	4–6
Криві радіусом 800–651 м	5–7
Криві радіусом 650–501 м	6–8
Криві радіусом 500–351 м	7–9
Криві радіусом менше 350 м	8–10

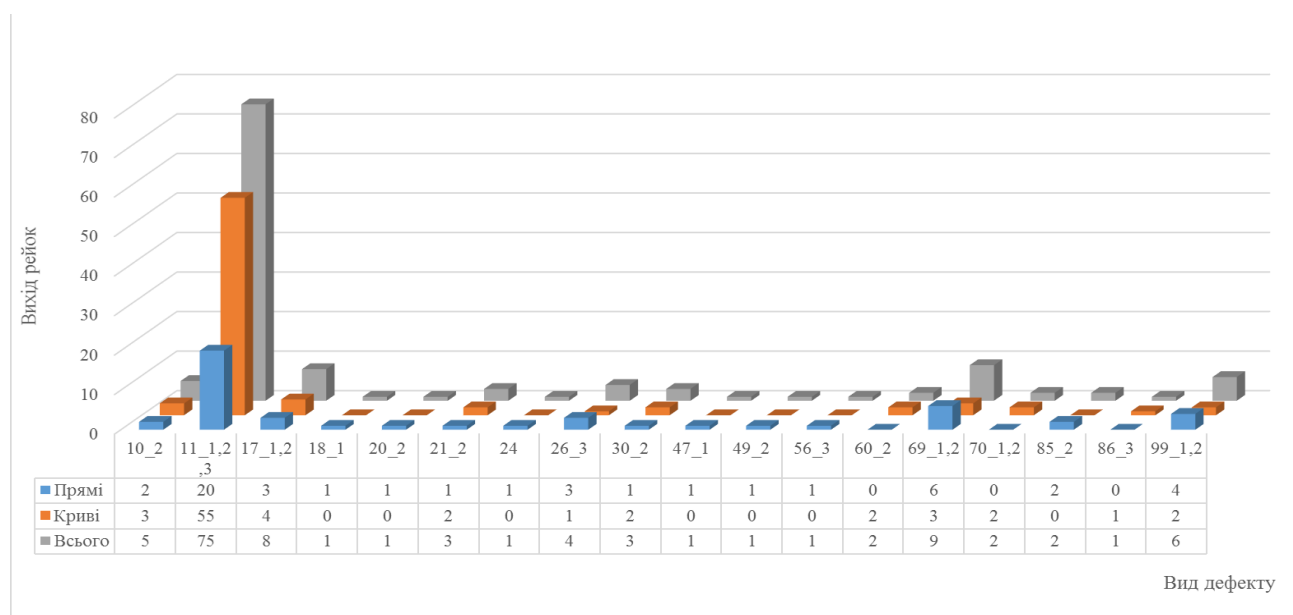
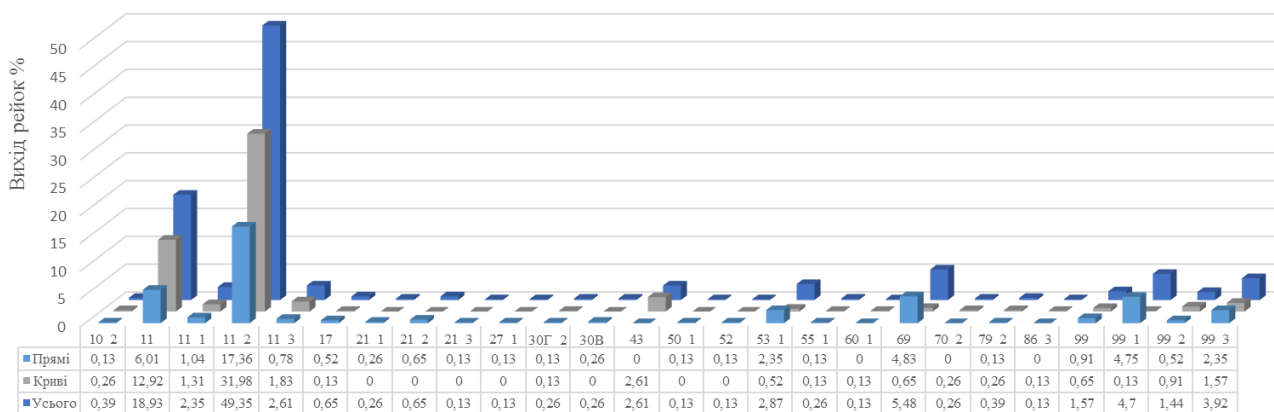


Рис. 1. Загальний вихід рейок по метрополітену в період 1986–2001 рр.



Вид дефекту

Рис. 2. Загальний вихід рейок по метрополітену в період 2005–2011 рр.

При побудові діаграм прямі ділянки колії, а також криві з радіусом більше ніж 1000 м було віднесено до категорії «Прямі», криві менших радіусів – до категорії «Криві».

Робити певні висновки про роботу рейок по лінії «О» в період 1986–2001 рр. не було можливим через відсутність достатнього обсягу статистичних даних. Тому на рис. 1 відображені дані тільки щодо ліній «Х» і «С».

Основними видами дефектів рейок були дефекти контактнo-втомного походження, за кодами 11.1, 11.2, 11.3 (табл. 3), які розвиваються у головці рейки з причин недостатньої контактнo-втомної міцності рейкової сталі.

Оскільки укладання рейок змінювалося у межах 1977–2008 рр., то масив даних практично містив кілька циклів експлуатаційної роботи рейок як по окремих лініях, так і в цілому по метрополітену. Це дало змогу встановити різні види пошкоджень і дефектів рейок на початковій стадії їх роботи, а також виконати дослідження інтенсивності раптових та поступових відмов у період експлуатації рейок.

Такий диференціальний підхід дає змогу правильно висвітлити роботу рейок з урахуванням причин розвитку дефектів та пошкоджень, а також виділити групу

найбільш типових дефектів. А це у свою чергу дає можливості для подальшої розробки математичної моделі експлуатаційної надійності рейок залежно від пропущеного тоннажу та кривизни залізничної колії з подальшою обробкою і систематизацією за видами дефектів та пошкоджень.

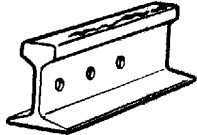
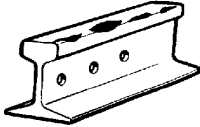
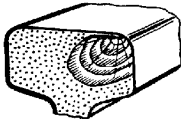
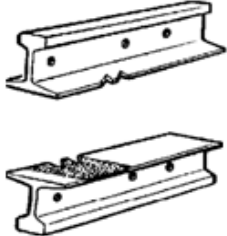
Чинним документом у колійному господарстві метрополітенів України, який визначає вид дефекту рейок, є «Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України». За даними рис. 1 і 2 можна побачити, що найбільш характерними дефектами рейок на Харківському метрополітені виявлені ті, що наведені у табл. 3.

Висновки. Завдяки зробленому аналізу пошкоджень та дефектів рейок у Харківському метрополітені можна побачити, що найпоширенішими є дефекти за кодами 11.1-3, а саме викришування металу на бічній робочій викружці внаслідок недостатньої контактнo-втомної міцності металу.

Кількість таких дефектів складала у 1986–2011 рр. до 75 %. При цьому основна частина цих дефектів за кодом 11 виникає в кривих ділянках колії. Це призводить до посиленого зносу бічної грані головки зовнішньої рейки і розвитку дефектів контактнo-втомного походження першої групи.

Таблиця 3

Найбільш характерні дефекти рейок на Харківському метрополітені

Найменування дефекту і основні причини його появи та розвитку	Цифровий код дефекту	Схематичне зображення
Відшарування і викришування металу на поверхні кочення через недоліки або порушення технології виготовлення	10.1-3	
Викришування металу на бічній робочій викружці внаслідок недостатньої контактної міцності металу	11.1-3	
Поперечні тріщини в головці у вигляді світлих і темних плям і злами через них внаслідок недостатньої контактної міцності металу	21.1-3	
Корозія, підгоряння або місцевий знос підшви рейки та втомні тріщини через них	69.1-3	

На другому місці за частотою виникнення є корозійно-втомні тріщини в підшві рейок у зонах зварних стиків та поза нею. Виникненню таких дефектів, окрім дії рухомого складу, сприяє підвищена вологість в умовах колії метрополітену.

Дефекти у вигляді змінання головки внутрішньої рейки в кривій, які свідчать, про перевантаження внутрішньої нитки, не перевищують 3%. Виникнення цих дефектів пов'язане з надмірним підвищенням рівня зовнішньої нитки або зі зменшенням швидкості руху відносно

розрахункових величин, згідно з якими влаштовувалось існуюче підвищення.

У діаграмах це не відображено, але важливо підкреслити, що спостерігається тенденція до збільшення виходу рейок за цими видами дефектів зі зменшенням радіуса колії. Це цілком зрозуміло, оскільки при зменшенні радіуса кривої дія бічних зусиль на головку рейки збільшується.

Проведений аналіз вказує на існуючу проблему ураження колій дефектами контактної втомного походження, а також порушує питання визначення методів для її розв'язання.

Список використаних джерел

1. Darenkiy A., Potapov D., Tuley Y., Bugaets N., Malishevskaya A. Revisiting the reasons for contact fatigue defects in rails. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116. 03001.

2. Йосифович Р. М. Наукове обґрунтування і практичне вирішення проблеми підвищення експлуатаційного ресурсу рейок Київського метрополітену в 2013–2016 рр.: автореф. дис... канд. техн. наук. Київ : ДЕТУТ, 2016. 26 с.

3. Даніленко Е. І., Йосифович Р. М., Олійник О. А., Сорока О. О. Дослідження впливу динамічних колісних навантажень, вантажонапруженості і швидкостей руху поїздів на міцність, стійкість і строки служби рейок, скріплень та інших елементів ВБК. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Сер. Транспортні системи і технології*. Київ, 2013. № 22. С 10–20.

4. Taraf M. et al. Numerical analysis for predicting the rolling contact fatigue crack initiation in a railway wheel steel. *Tribology International*. 2010. № 3(43). С. 585–593.

6. Инструкция по текущему содержанию пути и контактного рельса метрополитенов. Москва, 1995. 160 с.

7. Правила технічної експлуатації Харківського та Дніпропетровського метрополітенів. Харків, 2005. 222 с.

8. Технічні вказівки на експлуатацію рейок та елементів стрілочних переводів КП «Харківський метрополітен». Харків, 2012. 7 с.

9. Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України. Київ: ТОВ «Інпрес», 2013. 194 с.

Вітольберг Володимир Геннадійович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Потапов Дмитро Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Малішевська Аліна Сергіївна, канд. техн. наук, асистент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 0930201843. E-mail: kttolik@gmail.com.

Муригіна Надія Олександрівна, асистент кафедри колії та колійного господарства Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Vitolberh Volodymyr Hennadiiovych, PhD (Tech.), Assistant Professor, Department of Track and Track Facilities Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Potapov Dmytro Oleksandrovych, PhD (Tech.), Assistant Professor, Department of Track and Track Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Malishevskaya Alina Serhiivna, PhD (Tech.), Assistant Lecturer, Department of Track and Track Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: kttolik@gmail.com.

Muryhina Nadiia Oleksandrivna, PhD (Tech.), Assistant Lecturer, Department of Track and Track Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: ppx_xiit@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 19.04.2019 р.

УДК 621.89

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЙКОЗМАЩУВАЧІВ АЕРОЗОЛЬНОГО ТИПУ

Асп. Б. С. Асадов

DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE AEROSOL TYPE RAIL LUBRICATORS

Postgraduate student B. S. Asadov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176431>

У статті наведені результати експериментальних досліджень технологічних параметрів дослідного зразка рейкозмащувача аерозольного типу. Дослідний зразок являє собою мастильний агрегат закритого типу, який живиться стисненим повітрям і дає змогу виконувати регулювання подачі повітря та оливи до робочої форсунки. Для нанесення мастильного матеріалу на робочу поверхню використовується коаксіальна форсунка із зовнішнім утворенням аерозолю – суміші оливи та повітря.

Вимірювались геометричні розміри плями оливи, нанесеної на вертикальну поверхню, залежно від відстані між форсункою та поверхнею. Також були встановлені залежності ширини плями оливи, товщини мастильного шару та граничного часу розпилу від подачі оливи та повітря.

За результатами лабораторних досліджень була виконана оцінка ефективності рейкозмащувача аерозольного типу за критерієм загальної витрати мастильного матеріалу за прогнозований ресурс рейок у кривих ділянках колії.

Ключові слова: рейка, мастильний матеріал, стиснене повітря, рейкозмащувач, аерозоль.

The article presents the results of experimental studies of technological parameters of a pilot sample of aerosol type lubricant. As a lubricant, the industrial I-12A oil was added with the addition of graphite powder to it, which provides the implementation of a two-layered coating of the working surface of the rail. The test piece is a closed type oiling unit, which feeds on compressed air and allows the regulation of air and oil supply to the working nozzle. For drawing of a lubricant on a working surface the coaxial nozzle with the external formation of an aerosol - a mixture of oils and air is used.

Studies were conducted in laboratory conditions. At the first stage, the geometric dimensions of the stain of the oil applied to the vertical surface were measured, depending on the distance between the nozzle and the surface. Such data makes it possible to adjust the settings of the injector placement relative to the rail, taking into account the permissible dimension of the approach, which is essential for the introduction of rail pads under operating conditions. Subsequently, depending on the width of the stain of the oil and the thickness of the lubricating layer from the supply of oil and air, were installed. Also, the dependencies of the cutting time of oil and air are set. The obtained data are necessary for determining the oil consumption in the operation of similar rail lubricants in real conditions. In addition, these data allow you to adjust the control system of the rail lubricant by the criterion of the limit time of cutting the oil and minimizing the cost of lubricant.

According to the results of laboratory studies, an estimation of the effectiveness of the aerosol type air-lubricant was performed on the criterion of the total consumption of the lubricant for the

predicted resource of the rails in the curved sections of the track. It was obtained the dependence of the number of inclusions of the lubricant and the lubricant flow rate on the number of load cycles for the rails for the projected resource. For one load cycle, a single passage of the wheelset of rolling stock along the rail was taken.

Keywords: rail, lubricant, compressed air, rail lubricators, aerosol.

Вступ. У всіх країнах світу, де є залізниця, актуальним питанням залишається зменшення інтенсивності зношування пари колесо-рейка. Цю проблему вирішують різними способами, до яких належать плазмове зміцнення та наплавлення гребенів колісних пар, рейкошліфування та найпоширеніший – лубрикація. Лубрикатори (системи змащування), що використовуються на залізниці, можна поділити на такі, що змащують гребені коліс і встановлюються на локомотивах та моторвагонних рухомих складах, і такі, що змащують бічні грані головки рейки в кривих та на стрілочних переводах. Останні у свою чергу є пересувними та стаціонарними. Конструкція лубрикаторів різноманітна, але переважно залежить від виду та способу нанесення мастильного матеріалу.

Під час експлуатації вищеперелічених систем змащення на українській залізниці було виявлено ряд недоліків [1]. Так, при використанні механічних рейкозмащувачів плунжерного типу спостерігалось неповне рознесення мастильного матеріалу на необхідну відстань, велика його витрата та застигання взимку. У лубрикаторів з програмним забезпеченням «Лінкольн» під час збою в роботі відбувається вилив мастила на колію, що призводить до забруднення навколишнього середовища та значних фінансових витрат для відновлення його роботи. Що стосується локомотивних установок змащування гребенів коліс локомотивів, то основним недоліком є потрапляння мастила на поверхню кочення, що призводить до буксування колісних пар.

Значною мірою позбутися таких недоліків під час експлуатації лубрикаторів та підвищити їх ефективність дає змогу використання аерозольного принципу

нанесення мастильного матеріалу. Але на сьогодні немає чітко визначених технологічних параметрів рейкозмащувачів аерозольного типу для використання на залізниці та не дана оцінка їх ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш частими дефектами рейок у кривих ділянках є дефекти 10.1-2, 11.1-2, 21.1-2, 37.1-2, 44.1-2 відповідно до класифікації [2]. Природа таких дефектів пов'язана з високими діючими навантаженнями [3] та недостатньою зносостійкістю і контактано-втомною міцністю рейкової сталі [4]. Безперечно, застосування змащення є перспективним методом боротьби зі зносом рейок і коліс [5]. Але перед його застосуванням необхідно враховувати умови роботи трибологічної системи «колесо-рейка», а саме високі контактні напруження. І для зменшення інтенсивності зношування необхідно реалізувати такий вид мащення, при якому б зменшився контактний тиск у парі тертя «колесо-рейка». Таким видом мащення є двошарове мащення і обґрунтованість його реалізації розглянуто в роботі [6]. Але слід зауважити, що в роботі [6] бракує інформації щодо вибору мастильного матеріалу та системи змащення, яка б дала можливість реалізувати двошарове мащення. Частково це питання було розглянуто в роботі [7], де детально обґрунтовано склад та будову необхідного мастильного матеріалу для автоматичних рейко- та гребенезмащувачів, але не розкрито питання аерозольного методу нанесення мастильного матеріалу. У роботі [8] проведені дослідження процесу нанесення мастильного матеріалу аерозольним методом з використанням оливи Liqui Moly 10W40 з дисульфідом молібдену. Але ця олива є необґрунтовано дорогою, тому доцільнішим є використання

індустріальної оливи з невисокою в'язкістю та графітовим порошком як протизношувальною присадкою. Це дасть змогу значно зекономити фінансовий ресурс. Таким чином, необхідно дослідити процес аерозольного нанесення індустріальної оливи з графітом та встановити необхідні параметри такої системи змащення.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження параметрів аерозольного нанесення індустріальної оливи при додаванні порошку графіту з подальшою оцінкою ефективності роботи рейкозмащувачів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити вплив наближення форсунки до поверхні рейки, подачі оливи та повітря на розмір мастильної плями при аерозольному нанесенні;
- встановити граничний час розпилу мастильного аерозолі;
- оцінити ефективність рейкозмащувачів аерозольного типу за критерієм витрати мастильного матеріалу за прогнозований ресурс рейок.

Основна частина дослідження. Для досліджень була обрана індустріальна олива підгрупи А марки И-12А за ГОСТ 207-99. Концентрація графітового порошку в оливі становила 2 %.

Для проведення експериментальних досліджень з визначення основних параметрів аерозольного нанесення мастильного матеріалу на поверхню рейок було розроблено експериментальну установку, яка зображена на рис. 1.

Першочерговим завданням було встановити вплив зазора між форсункою і поверхнею рейки на геометрію плями. Для цього на поверхню для напилення 11 було прикріплено міліметровий папір, на який за допомогою блока управління 7 проводилося аерозольне напорскування протягом певного часу. Після чого вимірювались геометричні розміри утвореної плями (рис. 2). Ця процедура проводилась з відстанню між форсункою та поверхнею 50 мм, 75 мм та 100 мм.

За отриманими даними було графічно побудовано залежність розміру півосей плями від величини зазора (рис. 3).

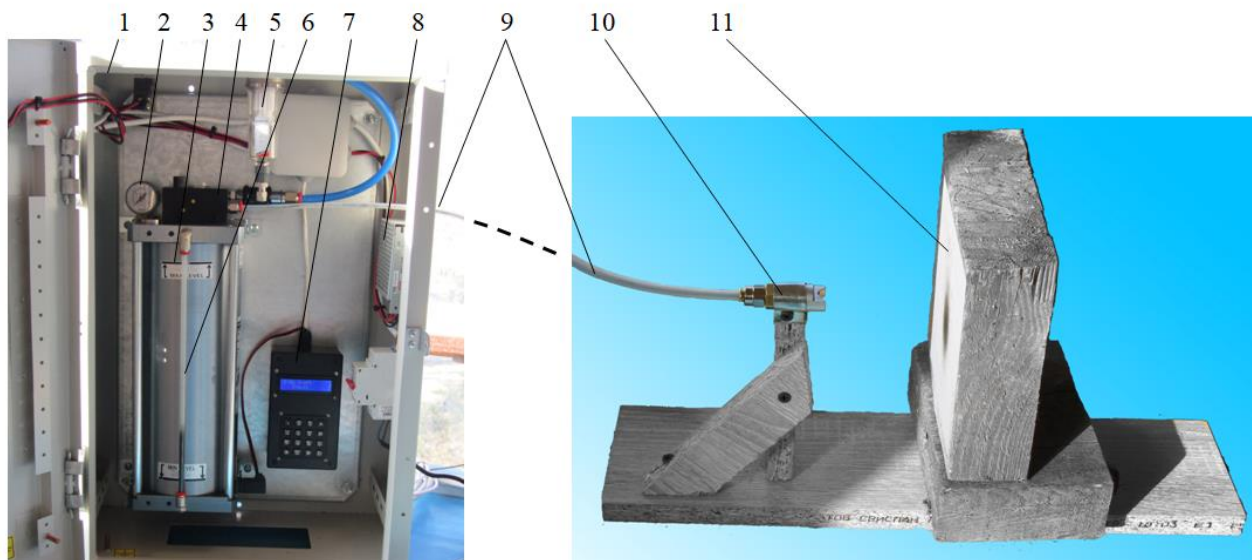


Рис. 1. Експериментальна установка:

- 1 – корпус; 2 - манометр; 3 – бак з оливою; 4 – регулятор подачі оливи і повітря; 5 – повітряний фільтр; 6 – показник рівня оливи; 7 – блок управління; 8 – блок живлення; 9 – коаксіальний трубопровід; 10 – форсунка з коаксіальним підведенням оливи та повітря; 11 – поверхня для напилення

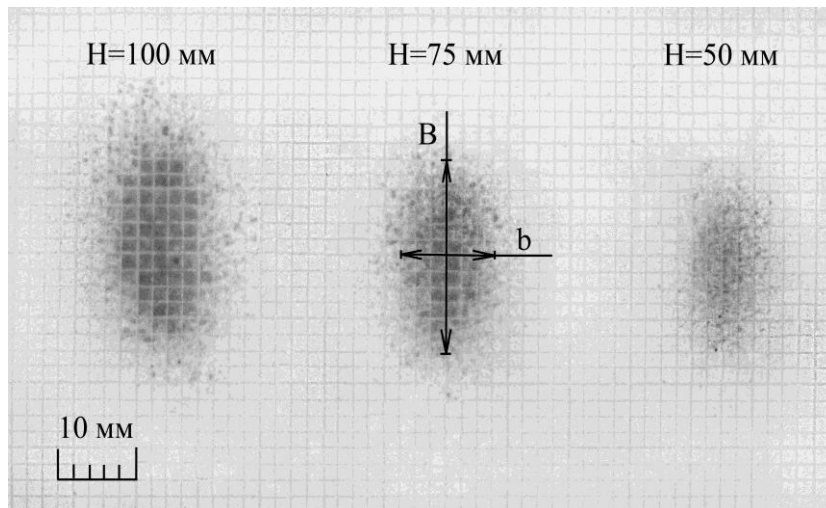


Рис. 2. Фотографії та метод обробки експериментальних плям:
 H – зазор між форсункою і поверхнею; B – велика вісь плями; b – мала вісь плями

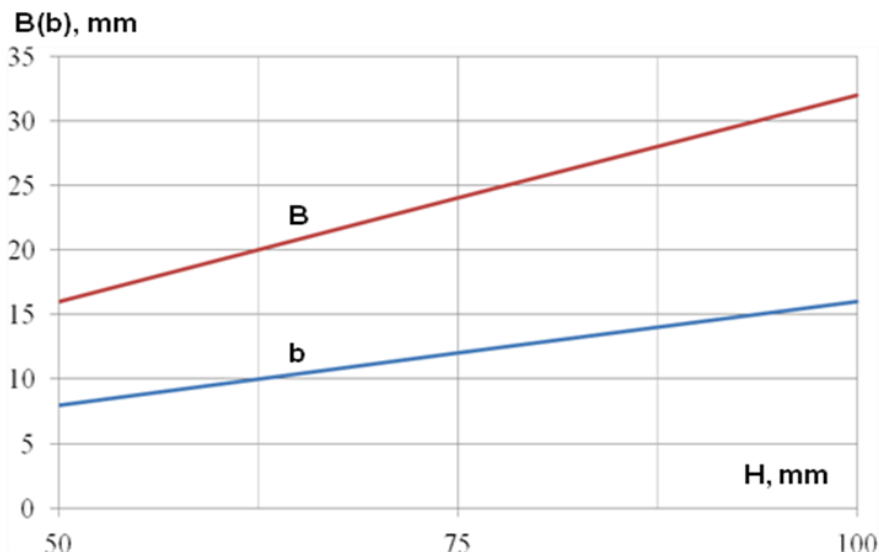


Рис. 3. Залежність розміру півосей плями від величини зазора

Отримані дані дають змогу підбирати необхідний розмір плями, що наноситься на бічну поверхню рейки. При цьому враховується допустимий габарит наближення форсунки до рейки, а також забезпечується точне позиціонування плями в зоні зносу без напорскування оливи на поверхню кочення

Наступним етапом дослідження було встановлення впливу подачі повітря й оливи на геометрію плями, що наноситься

та товщину мастильного шару. Результати наведені на рис. 4 та 5.

Товщина шару розраховувалася через отримані значення осей оливної плями B і b , а також заданий кут змочування.

Далі необхідно було встановити залежність граничного часу розпилю від подачі оливи та повітря. Результати цих вимірювань показані на рис. 6. Слід лише зауважити, що граничний час розпилю обмежує величину осей оливної плями за значенням гранично допустимої ширини.

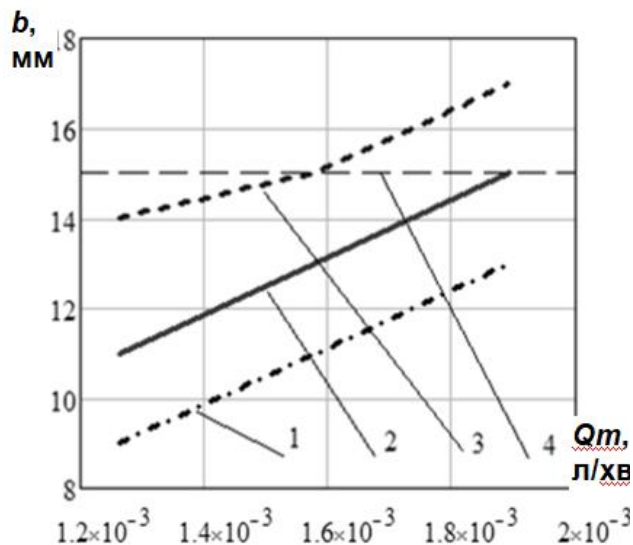


Рис. 4. Залежність ширини плями від подачі оливи та повітря:
 1 – $Q_B = 19$ л/хв; 2 – $Q_B = 26$ л/хв; 3 – $Q_B = 33$ л/хв; 4 – гранично допустима ширина за умовою напорскування оливи на поверхню кочення
 Час роботи форсунки у всіх випадках – 5 с

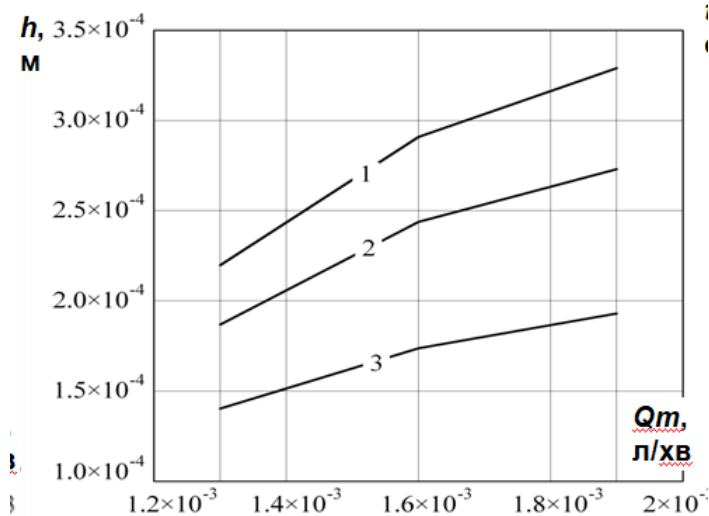


Рис. 5. Залежність товщини мастильного шару від подачі оливи та повітря:
 1 – $Q_B = 19$ л/хв; 2 – $Q_B = 26$ л/хв; 3 – $Q_B = 33$ л/хв

Отримані експериментальні дані дають змогу розробити практичні рекомендації щодо організації процесу нанесення мастильного матеріалу на бічну робочу поверхню рейок.

Наступним завданням, яке необхідно виконати для досягнення мети, є оцінка ефективності рейкозмашувачів аерозоль-

ного типу за критерієм витрати мастильного матеріалу за прогнозований ресурс, який у наближеному розрахунку становить $2,5 \cdot 10^7$ циклів навантаження, тобто колісних пар, що пройшли по рейці до досягнення граничного бокового зносу (рис. 7).

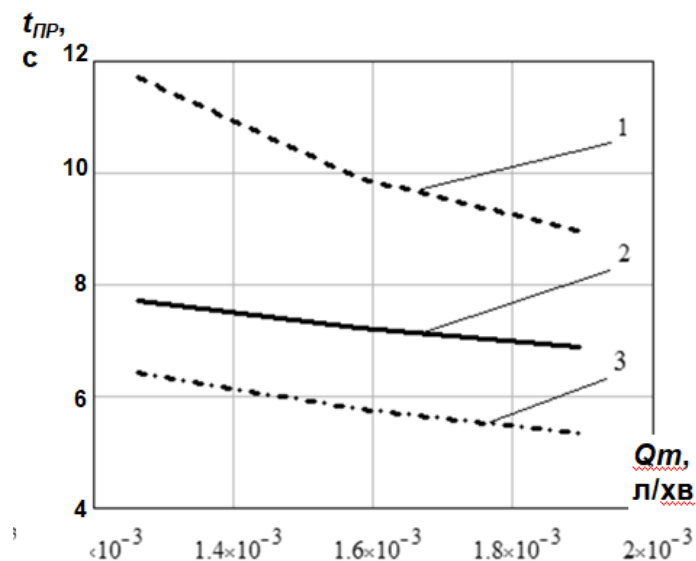


Рис. 6. Залежність граничного часу розпилю від подачі оливи та повітря:
 1 – $Q_B = 19$ л/хв; 2 – $Q_B = 26$ л/хв; 3 – $Q_B = 33$ л/хв

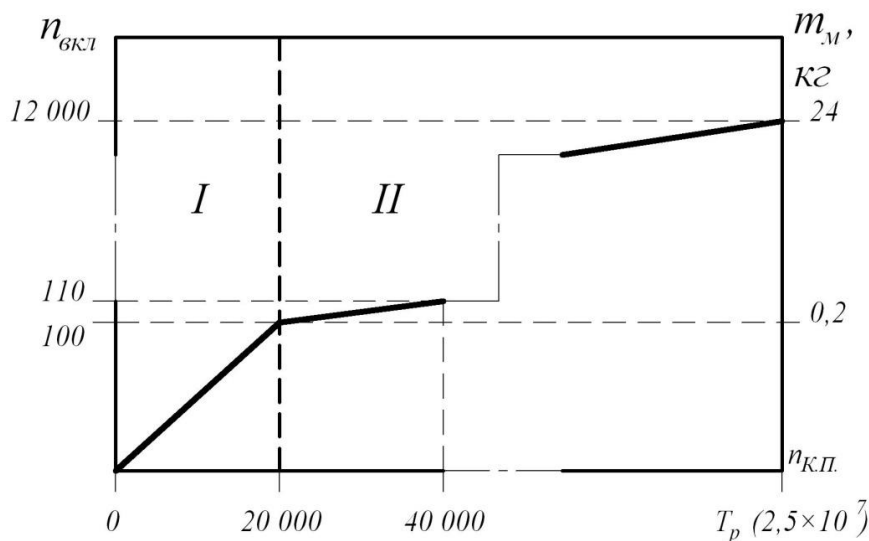


Рис. 7. Залежність кількості включень і витрати оливи від кількості колісних пар

На рис. 7 область I є періодом насичення робочої поверхні рейки мастильним матеріалом по довжині кривої. Область II відображає роботу системи в режимі мінімальних витрат оливи з урахуванням зносу мастильної плівки через певну кількість циклів навантаження.

Отримані на рис. 7 дані говорять про високу ефективність рейкозмащувачів аерозольного типу, оскільки розрахункова

витрата оливи по всій кривій за повний ресурс становить лише 24 кг, що є досить низьким показником, порівняно із рейкозмащувачами іншого типу.

Висновки:

1. Отримані залежності геометричних розмірів плями оливи, нанесеної на робочу поверхню рейки, від відстані між форсункою та поверхнею дають змогу

виконувати налаштування розміщення форсунок відносно рейки з урахуванням допустимого габариту наближення, що є суттєвим при впровадженні рейкозмащувачів аерозольного типу в експлуатаційних умовах.

2. Отримані залежності ширини плями оливи, товщини мастильного шару та граничного часу розпилу від подачі оливи та повітря є необхідними для

налаштування подачі оливи та повітря і часу розпилу за одне включення при роботі рейкозмащувачів у реальних умовах. Крім того, ці дані є базовими для виконання оцінки витрат мастильного матеріалу та вибору параметрів системи живлення.

3. Рейкозмащувачі аерозольного типу мають високу, порівняно з іншими типами, ефективність, установлену за критерієм загальної витрати мастильного матеріалу.

Список використаних джерел

1. Колесо-рейка: як зменшити інтенсивність зношення? *Залізничний інформаційний портал*. URL: <https://info.uz.ua/articles/koleso-reyka-yak-zmenshiti-intensivnist-znosu> (дата звернення: 04.04.2019).
2. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України: ЦП-0284. Київ : Укрзалізниця, Головне управління колійного господарства, 2013. 194 с.
3. Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом: у 2 т. Київ: Інпрес, 2010. Т. 1. 528 с.
4. Богданов В. М., Захаров С. М. Современные проблемы системы колесо-рельс. *Железные дороги мира*. 2004. № 1. С. 25–33.
5. Voronin S. Development of tribophysical foundations of lubricity of liquid crystal additives to base oil. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2015. Vol.3. No.7. P. 53–57.
6. Voronin S., Skoryk O., Stefanov V., Onoprychuk D., Korostelov Ye. Study of the predominant defect development in rails of underground systems after preventive grinding and lubrication. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116. Article Number: UNSP 03005.
7. Панченко С. В., Воронін С. В., Ремарчук М. П., Асадов Б. С. Обґрунтування вимог до мастильних матеріалів систем автоматичного змащування рейок. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 175. С. 6–11.
8. Voronin S., Hrunyk I., Asadov B., Onoprychuk D., Stefanov V. Study of the process of lubricant application on the friction surface using aerosol lubricators. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, Iss. 4. P. 20–24.

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

Asadov Bashir Sabir Ohlu, Postgraduate student, Department of Construction, Road and Loading Machines of the Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-66. E-mail: spprm@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 22.04.2019 р.

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

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

Випуск 184

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

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

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

Редактор Еткало О. О.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 23.04.2019 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 9,5. Тираж 64. Замовлення № .

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