



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 205

Харків 2023

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки та інші матеріали вчених, фахівців залізничного транспорту і промислових підприємств, спрямовані на вирішення сучасних завдань і проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, теплоенергетики та матеріалознавства, автоматики, телемеханіки та зв'язку тощо.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, здобувачів вищої освіти і науковців залізничного транспорту та інших галузей промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: <https://bit.ly/3vVHlv3>.

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: <https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt>

Реферативна база

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

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПП від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 5 від 29 вересня 2023 р.

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

Редакційна колегія

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

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

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путятю А. В., д.т.н., доцент (ГДТУ ім. П. О. Сухого, Республіка Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинів І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор
(НУ Львівська політехніка)
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professor (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)
Онопрійчук 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 (Tohoku University, Японія)

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 (ДБТУ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Геодезія та землеустрій (193)

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

Теплоенергетика (144)

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

ЗМІСТ

Механічна інженерія (131, 132, 133)

<i>Воронін С. В., Харківський О. С., Губін О. О.</i> Вплив напрацювання та електричної обробки мастильного матеріалу на зносостійкість підшипників ковзання	6
<i>Нерубацький В. П., Геворкян Е. С., Комарова Г. Л., Морозова О. М., Цибульник В. Р.</i> Особливості отримання ріжучого інструментального матеріалу на основі нанодисперсних порошків за рахунок електроспінання	14
<i>Казанко О. В., Пенкіна О. Є.</i> Розповсюдження механічних хвиль у двовимірному шаруватому середовищі	25
<i>Novodvorskyi V., Ivanitsky G., Shved N.</i> Numerical study of the non-isothermal flow of the polymer melt with undermelted granules in the conical annular channel of a disc extruder	37

Будівництво та цивільна інженерія (192)

<i>Золотов С. М., Пустовойтова О. М., Трикоз Л. В., Камчатна С. М., Савісько С. А.</i> Вплив властивостей клейового шару на напружено-деформований стан з'єднання при клейовому анкеруванні сталевих стрижнів у бетон	51
<i>Ромашко-Майструк О. В., Ромашко В. М.</i> Основні особливості деформування бетону за дії динамічних навантажень	60
<i>Альмохамад М.</i> Про метод моделювання прогресуючого обвалення залізобетонного каркаса при дії пожежі	70

Залізничний транспорт (273)

<i>Мороз В. І., Громов В. І., Логвіненко О. А.</i> Особливості оптимізаційного проектування і оцінювання технічного ресурсу тягових зубчастих передач рухомого складу залізниць	86
---	----

Транспортні технології (275)

<i>Lomotko D., Ogar O., Lomotko M., Afanasova O.</i> Modeling the railway and automobile supply chain on the basis of «green» logistics	98
<i>Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А.</i> Дослідження системи перетворення енергії на сонячних електростанціях за рахунок використання розподіленого відстеження максимальної потужності фотоелектричної панелі	111
<i>Ковальов А. О., Шапатіна О. О., Кім К. В., Багмут І. П., Валецька В. В.</i> Оцінювання перспектив впровадження швидкісного руху на залізничних магістралях України	122
<i>Shuldiner Ju., Prymachenko H., Pashenko G. S.</i> Improving the efficiency of cargo transportation in international communication through land border crossings in Ukraine	132

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 621.89

ВПЛИВ НАПРАЦЮВАННЯ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ОБРОБКИ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ

Д-р техн. наук С. В. Воронін, аспіранти О. С. Харківський, О. О. Губін

OPERATING TESTS OF THE DEVICE FOR ELECTROSTATIC ENGINE OIL TREATMENT

Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, postgraduate student O. Kharkivskiy,
postgraduate student O. Hubin

***Анотація.** У статті наведені матеріали експериментальних випробувань підшипників ковзання (дизельного двигуна Д-240) на зносостійкість і ресурс на машині тертя СМЦ-2. Випробування проведені для моторної оливи з різним напрацюванням у двигуні, від початкового стану свіжої оливи до повного напрацювання, що відповідає періодичності регламентної заміни. Також у випробуваннях частина зразків оливи підлягала попередній обробці зовнішнім електричним полем для інтенсифікації поверхневої активності присадок, що призводить до відповідного позитивного впливу на мастильну здатність оливи та зносостійкість елементів підшипників ковзання.*

***Ключові слова:** дизельний двигун, підшипник ковзання, моторна олива, електрична обробка, напрацювання, зносостійкість, ресурс.*

***Abstract.** The article presents the results of preliminary studies aimed at establishing the main factors affecting the service life of sliding bearings. The researchers pay special attention to the dominant types of lubrication, the thickness of the lubricating film, the load-bearing capacity of the film, shear resistance during friction, as well as the aging of the oil and the loss of its properties over time. Taking into account the previous achievements, as well as the works of the authors in the direction of increasing the wear resistance and resource of sliding bearings, it is proposed to test the sliding bearings of the D-240 diesel engine on the SMC-2 friction machine. The tests were performed according to the "pad - roller" scheme. In this diagram, the roller simulates the neck of the crankshaft, it is made of HF cast iron. The pad presses against the roller a fragment of the liner, which was made from a real engine liner and is a bimetallic element with a steel base and an anti-friction coating of AO-20-1 alloy. In the tests, the sliding friction of the liner fragment on the roller was modeled, and the load modes of the friction pair were set in such a way that mixed lubrication of the bearing or transitional lubrication from limit to hydrodynamic lubrication is achieved. The purpose of the tests was to establish the regularities of the impact of engine oil aging and its electrical processing on the wear resistance and service life of the bearing liners. For this, oil samples were taken from the engine lubrication system. Oil samples with 0, 150, 300 engine hours were tested. The complete experiment consisted of two series of trials. The first series of tests concerned the establishment of the effect of working on the wear resistance when lubricating the bearing with traditional oil taken from the engine. The second similar series of tests included the*

additional introduction of electrical treatment of the oil samples before it was fed to the bearing model. The values of weight wear of liner fragments were obtained experimentally. The wear resistance and service life of the liners were calculated according to the corresponding dependencies, which are also given in the article. As a result of measurements and calculations, the regularities of the effect of working on the conditional life of the liners were obtained, taking into account the effect of the electrical treatment of the oil.

Keywords: diesel engine, sliding bearing, engine oil, electrical processing, operating time, wear resistance, resource.

Вступ. Підшипники ковзання (ПК) залишаються одною з розповсюджених груп рухомих опор у різних технічних системах. Надійність цих елементів залежить від багатьох факторів, до яких у першу чергу слід відносити конструкцію вузла, матеріали вкладишів і валів (осей), кінематику, зовнішні навантаження, трибологічні властивості мастильних матеріалів, температурні впливи.

Залежно від поєднання та рівня вказаних факторів будь-який підшипник ковзання характеризується власною навантаженістю, оцінюваною безрозмірним параметром Зоммерфельда або ж числом Герсі [1]. Значенням цього параметра відповідають втрати на тертя в підшипнику, що відбуваються за чотирьох можливих видів тертя і мащення: сухе тертя – граничне мащення – змішане мащення – рідинне мащення. Кожному виду притаманні власні значення коефіцієнта тертя, загальну закономірність якого відображує відома крива Герсі-Штрибека [1].

Найпоширенішою групою ПК є радіальні циліндричні підшипники, розраховувані з умови забезпечення рідинного, частіше за все, гідродинамічного мащення. Найбільш напруженими серед цієї групи є ПК сучасних двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Вони, хоча й розраховуються на гідродинамічне мащення, суттєву частку часу працюють у змішаному або граничному мащенні, що обумовлено нестаціонарністю частоти обертів колінчастого вала, нерівномірністю розподілу тиску в області контакту, падінням в'язкості оливи на максимальних

температурах і з її напрацюванням у двигуні. Такі види мащення ПК призводять до зменшення їхньої зносостійкості, оскільки тертя відбувається за наявності надтонкої мастильної плівки, що призводить до підвищення інтенсивності зношування, переважно втомної та абразивної природи [2, 3].

Зазначені передумови свідчать про актуальність досліджень у напрямі підвищення зносостійкості ПК ДВЗ, причому найменш визначеним питанням, що сьогодні інтенсивно опрацьовується дослідниками в галузі машинобудування і трибології, є вплив характеристик оливи на зносостійкість. Ця невизначеність пов'язана, з одного боку, складністю фізико-хімічних процесів у зоні тертя при взаємодії оливи з поверхнями деталей, а з іншого боку, закритістю для фахівців-механіків передових технологій нафтопереробних компаній, що виготовляють оливи, особливо присадки до них [3]. У зв'язку з цим актуальними науково-практичними завданнями є пошук ефективних методів впливу на трибологічні властивості оливи, удосконалення методів прогнозування та випробування ПК при застосуванні оливи з модифікованими властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для усвідомлення актуальності підвищення зносостійкості ПК ДВЗ необхідно мати уявлення про розподіл втрат на тертя по елементах двигуна. Для цього скористаємося результатами дослідження [2], у якому встановлено, що втрати на тертя в ПК колінчастого вала ДВЗ сучасних автомобілів складають близько 25 % усіх втрат, що є дуже

суттєвим, особливо якщо врахувати достатньо низьку зносостійкість вкладишів цих ПК при роботі в змішаному або граничному мащенні. Для зменшення цих втрат на тертя сучасне машинобудування прагне зменшувати технологічний зазор, в'язкість оливи, товщину мастильної плівки, тобто змішувати вид мащення з чистого гідродинамічного до еластогідродинамічного або змішаного відповідно до кривої Герсі-Штрибека [3]. Однак, за висновками цієї ж роботи, такі кроки без зміни трибологічних властивостей оливи призведуть до зменшення довговічності шийок колінчастих валів і вкладишів, оскільки зросте інтенсивність зношування.

До основних напрямів покращення трибологічних характеристик моторних олив можна віднести такі:

– зменшення кута нахилу в'язкісно-температурної характеристики оливи для забезпечення меншої в'язкості на холодному двигуні та більшої на гарячому [1, 3];

– забезпечення підвищеної товщини та несучої здатності граничної мастильної плівки при одночасному зменшенні опору зсуву плівки шляхом розроблення нових типів олив і присадок до них, а також впливу на ці оливи і присадки зовнішніми силовими полями [3-12].

Перший напрям достатньо вузький і детально опрацьований, наприклад для традиційних мінеральних олив він полягає в застосуванні в'язкісних присадок, а у випадку синтетичних олив – отримання температурно стабільних основ [1].

Другий напрям можна умовно поділити на три складові: застосування більш ефективних, але традиційних присадок до базових олив; застосування нетрадиційних олив і присадок; застосування зовнішніх силових полів для інтенсифікації мастильної здатності як традиційних, так і нетрадиційних олив.

Що стосується застосування більш ефективних, але традиційних за своєю дією

присадок, то йдеться про додавання оливорозчинних поверхнево-активних речовин (ПАР) з підвищеною активністю до металу, наприклад шляхом збільшення дипольного моменту. Механізм дії таких присадок досить повно розкритий у минулому столітті, а результати робіт вчених різних країн світу відображені в монографії А. С. Ахматова [13].

До нетрадиційних олив відносять так звані електро- або магнітореологічні рідини, що являють собою суспензії полярних мікро- або наночастинок у неполярній рідині, які реагують на електричні та магнітні поля [4-9]. Результатом реакції на силові поля часто є підсилення властивостей граничної плівки на поверхнях тертя. Так, у роботі [4] встановлено збільшення в'язкості та товщини мастильної плівки електрореологічної рідини під дією електричного поля (ЕП). Аналогічні результати отримані в роботах [5-7], у тому числі для магнітореологічних рідин із застосуванням феромагнітних мікроскопічних частинок, у яких наведено підвищення несучої здатності мастильної плівки під дією відповідного силового поля. У роботі [8] наведені результати щодо збільшення несучої здатності рідкокристалічної граничної плівки під дією зовнішнього електричного поля, що корелюється з результатами роботи [10], де також досліджувався вплив ЕП на мастильну здатність олив. Досліджуються також іонні рідини для змашування трибологічних контактів, наприклад, в роботі [9] отримані цікаві результати з покращення трибологічних характеристик такої рідини при еластогідродинамічному мащенні неконформного контакту, який, на жаль, не можна віднести до ПК. Роботи [10-12] присвячені впливу ЕП на трибологічні властивості гідравлічних і моторних олив. Наприклад, робота [10] висвітлює деякі основні результати про позитивний вплив ЕП на мастильну здатність олив, а саме товщину граничної мастильної плівки,

втрати на тертя при граничному мащенні. Роботи [11,12] мають більш прикладний характер. Так, у роботі [11] наведені результати випробування мінеральної моторної оливи для тепловозного дизеля на машині тертя СМЦ-2 при застосуванні безперервної електричної обробки оливи при роботі двигуна. Робота [12] присвячена результатам випробування дизеля Д-240, оснащеного пристроєм для електричної обробки напівсинтетичної моторної оливи EXTRA DI 10W-40. У цій роботі отримано збільшення тиску оливи в головній магістралі, що лише опосередковано вказує на покращення мастильної здатності оливи та умов мащення ПК двигуна.

Перелічені роботи, їхня різноманітність свідчать про велику зацікавленість вчених щодо дослідження впливу силових полів як на традиційні, так й інші мастильні матеріали при змащенні ПК, при цьому експериментальна спрямованість цих робіт говорить про відсутність єдиних теоретичних основ такого впливу. Крім того, стосовно процесу мащення ПК ДВЗ залишаються невивченими питання впливу зовнішнього електричного поля на мастильну здатність напівсинтетичних і синтетичних олив, а також зміни зносостійкості ПК під впливом ЕП на мастильну здатність. Крім того, особливої уваги потребує вивчення впливу напрацювання моторної оливи у двигуні на можливість застосування її електричної обробки протягом строку служби оливи, оскільки її властивості суттєво змінюються. Так, у роботі [14] наведені результати розроблення методу діагностування ПК ДВЗ за аналізом спектра сигналів акустичної емісії. Також вказано на суттєвий вплив напрацювання оливи, що підтверджує необхідність урахування цього фактора.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення впливу напрацювання та режимів обробки моторної оливи зовнішнім ЕП під час

експлуатації на зносостійкість та умовний ресурс вкладишів колінчастого вала дизельного двигуна.

Матеріали, обладнання та методика дослідження. Для проведення випробувань обрані зразки напівсинтетичної моторної оливи EXTRA DI 10W-40 із різним терміном напрацювання в дизелі Д-240 колісного трактора МТЗ-82, оснащеного пристроєм для електричної обробки (ЕО) оливи перед її потраплянням до зони тертя. Періодичність відбору проб відповідала програмі експлуатаційних випробувань, результати яких наведені в роботі [12]. Напрацювання оливи складало 0, 150 і 300 мото-годин.

Об'єктом випробування на зносостійкість і ресурс є ПК колінчастого вала двигуна, а саме біметалевий шатунний вкладиш зі сталеву основою, вкритою сплавом АО-20-1, що працює в умовах тертя ковзання в парі з шийкою, яка виготовляється з чавуну ВЧ.

Моделювання умов тертя і змащування випробуваного ПК проводилося на машині тертя СМЦ-2 за схемою «колодка – ролик», наведеною на рис. 1.

На рис. 1 позицією 2 вказано фрагмент вкладиша – сегмент діаметром 65 мм, кут охоплення 36° , ширина 10 мм. Позиція 3 рис. 1 відповідає фрагменту шийки – ролик діаметром 65 мм, шириною 12 мм.

Режими навантаження ПК підбирали за цільовим змішаним режимом мащення, що встановлювався в точці переходу від граничного мащення до гідродинамічного. Відповідно до попередніх налаштувальних вимірювань обрані такі режими:

- нормальне навантаження $N = 1680 \text{ Н}$;
- тиск у контакті $p = 8 \text{ МПа}$;
- частота обертів $n = 16,67 \text{ с}^{-1}$;
- швидкість ковзання $v = 3,4 \text{ м/с}$ (початок переходу в ГД мащення);
- час одного випробування – 40 год;
- температура оливи $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$.

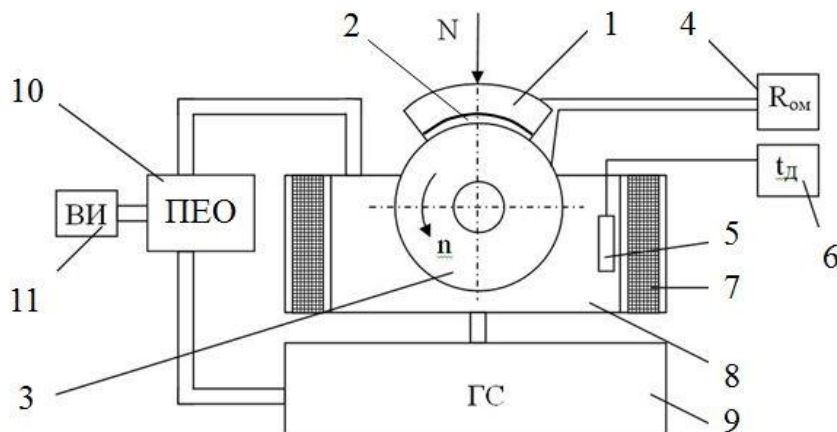


Рис. 1. Схема випробування ПК на машині тертя:

- 1 – колодка; 2 – фрагмент вкладиша; 3 – ролик; 4 – омметр; 5 – термодатчик;
6 – терморегулятор; 7 – нагрівач; 8 – стакан; 9 – гідростанція;
10 – лабораторний пристрій ЕО; 11 – високовольтне джерело

Експеримент включав дві паралельних серії випробувань ПК на зносостійкість: серія 1 – ПК зі змащенням оливою без ЕО при напрацюванні 0, 150, 300 мото-годин; серія 2 – ПК зі змащенням оливою, що підлягає обробці ЕП при такому самому напрацюванні.

У кожному окремому випробуванні вимірювався ваговий знос фрагмента вкладиша Δm за методикою статті [11], після чого за отриманими даними виконували перерахунок його інтенсивності лінійного зношування за формулою

$$I_h = \frac{\Delta m}{14400 \pi^2 a^2 b \rho n}, \quad (1)$$

де d – діаметр вкладиша;
 b – ширина вкладиша;
 ρ – щільність антифрикційного сплаву;
 n – частота обертів.

Після цього розраховували умовний ресурс вкладиша за формулою

$$T = \frac{U_{гр}}{3600 \pi d I_h n}, \quad (2)$$

де $U_{гр}$ – граничний знос антифрикційного шару, що складає 0,2 мм.

Отже, для обох серій випробувань отримано таку емпіричну функцію:

$$T = f(t), \quad (3)$$

де t – напрацювання оливи.

Результати дослідження та їх обговорення. Результати випробувань зведені в таблицю, де зношена маса вкладиша отримана експериментально.

За розрахунковими даними отримані рівняння регресії, що відображують закономірність зміни умовного ресурсу вкладиша від напрацювання за відсутності або наявності ЕО оливи.

Для оливи без ЕО

$$T = 1530t^{-0.901}, \quad (4)$$

а оливи з ЕО

$$T = 2750t^{-1.223}. \quad (5)$$

Адекватність обох рівнянь перевірялася за критерієм Фішера.

За отриманими рівняннями побудовані графіки залежності умовного ресурсу вкладиша від напрацювання та ЕО (рис. 2).

Результати випробувань і розрахунків

Показник	Формула розрахунку	Олива без ЕО при напрацюванні			Олива з ЕО при напрацюванні		
		0	150	300	0	150	300
Δm , мг	дані експерименту	3,4	6,5	9,1	1,9	4,5	7,2
$I_h \times 10^{-11}$	залежність (1)	1,06	2,03	2,84	0,59	1,41	2,25
T , мото-годин	залежність (2)	1540	804	575	2767	1158	725

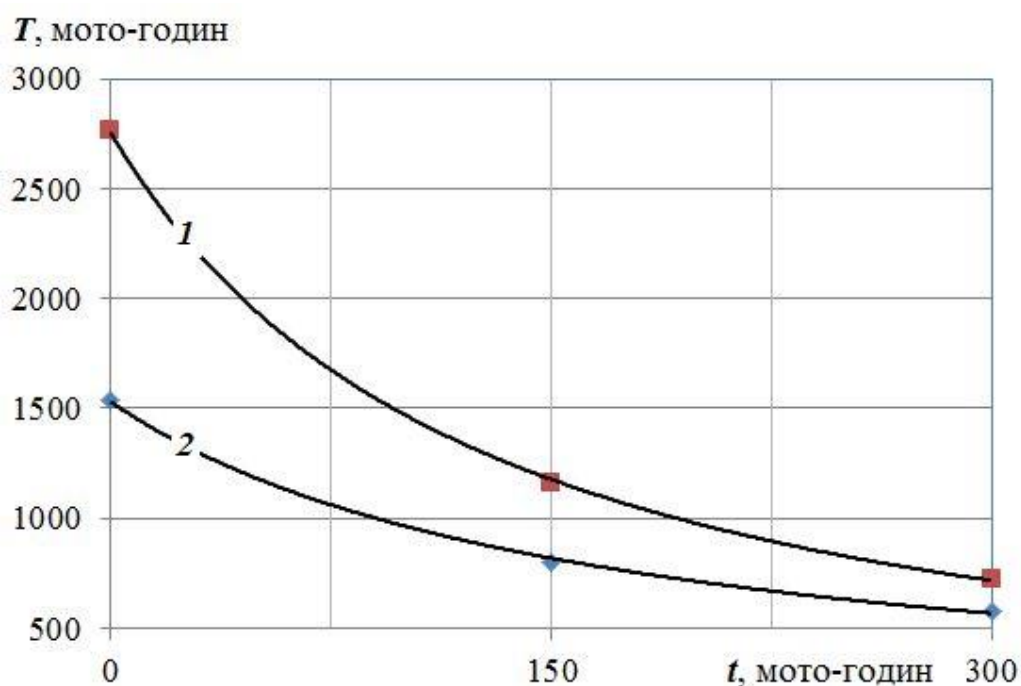


Рис. 2. Залежність умовного ресурсу вкладиша від напрацювання:
1 – з ЕО; 2 – без ЕО

За графіками на рис. 2, напрацювання оливи суттєво впливає на ресурс вкладишів. Так, при погіршенні властивостей оливи протягом повного строку напрацювання (300 мото-годин) інтенсивність зношування та умовний ресурс зменшується нелінійно майже в три рази для обох умов змащування. Під умовним ресурсом розуміється розрахунковий ресурс, що міг би бути досягненим при роботі дизеля на оливі з

відповідним конкретним напрацюванням, тобто якщо дизель працює на оливі з незмінними властивостями. Тому при прогнозуванні дійсного ресурсу вкладишів слід користуватися поняттям середнього ресурсу.

Застосування технології ЕО, розкритої в роботі [12], як видно з рис. 2, дає змогу збільшити умовний ресурс вкладишів в 1,8 рази для свіжої оливи та 1,3 рази для відпрацьованої оливи. Це

свідчить про те, що їхній дійсний середній ресурс може бути збільшений приблизно в 1,55 раза.

Висновки

1. Аналіз останніх робіт з дослідження мащення та довговічності підшипників ковзання показав, що головним прагненням науковців і конструкторів є забезпечення мінімального тертя і зношування елементів підшипників. Такого результату можна досягти зменшенням товщини гідродинамічної мастильної плівки до рівня еластогідродинамічної, навіть максимальної граничної, але при цьому слід забезпечити достатню несучу здатність плівки, бо при зменшенні тертя зростає інтенсивність зношування. Одним із перспективних методів вирішення цього завдання є застосування електричної обробки олив, при цьому особливої ефективності цей метод набуває при застосуванні сильно полярних специфічних присадок, здатних до утворення міцних рідкокристалічних молекулярних шарів з низьким опором зсуву в площині тертя.

2. На прикладі напівсинтетичної моторної оливи EXTRA DI 10W-40 із різним строком напрацювання в дизелі Д-240 проведені випробування вкладишів колінчастого вала на зносостійкість, що підтвердили високу ефективність електричної обробки оливи при терті зразків. Встановлено, що застосування технології ЕО під час експлуатації при роботі двигуна дає змогу збільшити умовний ресурс вкладишів в 1,8 раза для свіжої оливи та 1,3 раза для відпрацьованої оливи, при цьому їхній дійсний середній ресурс зростає в 1,55 раза.

3. Отримані експериментальні дані підтвердили також суттєвий вплив напрацювання оливи на зносостійкість і ресурс підшипників ковзання. Встановлено, що протягом повного строку напрацювання оливи у двигуні 300 мото-годин інтенсивність зношування та умовний ресурс вкладишів зменшується майже в три рази, незалежно від застосування електричної обробки. Такі дані свідчать про доцільність подальшої оптимізації періодичності заміни оливи.

Список використаних джерел

1. Чичинадзе А. В. Справочник по триботехнике. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / А. В. Чичинадзе, М. Хебда. Москва: Машиностроение, 1990. 419 с.
2. Holmberg K., Andersson P., Erdemir A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*. 2012. Vol. 47. P. 221–234. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.11.022.
3. Ligier J.-L., Noel B. Friction reduction and reliability for engines bearings. *Lubricants*. 2015. № 3(3). P. 569–596. DOI: 10.3390/lubricants3030569.
4. Nikolakopoulos P. G., Papadopoulos C. A. Controllable high speed journal bearings, lubricated with electro-rheological fluids, An analytical and experimental approach. *Tribology International*. 1998. Vol. 31, №. 5. P. 225-234. DOI: 10.1016/S0301-679X(98)00025-5.
5. Stanway R. Smart fluids: Current and future developments. *Mater Sci Technol* 20(8): 931–939 (2004). DOI.org/10.1179/026708304225019867.
6. Choi S. B., Wereley N. M., Li W., Yu M., Koo J. H. Applications of controllable smart fluids to mechanical systems. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014. Vol. 2014. P. 5–6. DOI: 10.1155/2014/254864.

7. Michalec M., Svoboda P., Krupka I., Hartl M. Tribological behaviour of smart fluids influenced by magnetic and electric field—A review. *Tribology in Industry*. 40(4): 515–528 (2018). DOI: 10.24874/ti.2018.40.04.01.
8. Matsumura Y., Shiraishi T., Morishita S. Stiffness and damping of liquid crystal lubricating film under electric field. *Tribology International*. 2012. Vol. 54. P. 32–37. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.05.009.
9. Michalec M., Svoboda P., Krupka I., Hartl M., Vencel A. Investigation of the tribological performance of ionic liquids in non-conformal EHL contacts under electric field activation. *Friction*. 8(5): 982–994 (2020). doi.org/10.1007/s40544-019-0342-y.
10. Voronin S., Dunaev A. Effects of electric and magnetic fields on the behavior of oil additives. *Journal of Friction and Wear*. 2015. Vol. 36. № 1. P. 33-39. DOI: 10.3103/S1068366615010158.
11. Лисіков Є. М., Воронін С. В., Афанасов Г. М., Гусак С. В. Протизношувальні випробування моторної оливи для тепловозних дизелів при обробці електромагнітним полем. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ, 2006. Вип. 73. С. 60-65.
12. Воронін С. В., Стефанов В. О., Харківський О. С. Експлуатаційні випробування пристрою для електростатичної обробки моторної оливи. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2022. Вип. 200. С. 11-24. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262678>.
13. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. Москва: Физматгиз, 1963. 472 с.
14. König F., Jacobs G., Stratmann A., Cornel D. Fault detection for sliding bearings using acoustic emission signals and machine learning methods. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1097. 012013. DOI:10.1088/1757-899X/1097/1/012013.

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Харківський Олександр Сергійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1222-9422. Тел.: +38(050)026-48-20. E-mail: kharsanya2806@gmail.com.

Губін Олександр Олександрович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8451-5236. Тел.: +38(099)788-19-06. E-mail: sash.gubin95@gmail.com.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Tel.: +38 (095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Kharkivskiyi Oleksandr, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1222-9422. Tel.: +38(050)026-48-20. E-mail: kharsanya2806@gmail.com.

Hubin Oleksandr, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8451-5236. Tel.: +38(099)788-19-06. E-mail: sash.gubin95@gmail.com.

Статтю прийнято 20.09.2023 р.

УДК 620.22.66

ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ РІЖУЧОГО ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ НАНОДИСПЕРСНИХ ПОРОШКІВ ЗА РАХУНОК ЕЛЕКТРОСПІКАННЯ

Канд. техн. наук В. П. Нерубацький, д-р техн. наук Е. С. Геворкян,
канд. техн. наук Г. Л. Комарова, асп. О. М. Морозова,
молод. наук. співр. В. Р. Цибульник

PECULIARITIES OF OBTAINING CUTTING TOOL MATERIAL BASED ON NANODISPERSED POWDERS BY ELECTRIC SINTERING

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkyan, PhD (Tech.) H. L. Komarova,
postgraduate O. M. Morozova, junior research fellow V. R. Tsybulnyk

Анотація. Статтю присвячено отриманню інструментальної кераміки з нанодисперсних порошків Al_2O_3 – WC методом гарячого вакуумного пресування та дослідженню їхніх властивостей. Ріжучий матеріал отримується за рахунок гарячого пресування прямим пропусканням електричного струму. Розроблений ріжучий матеріал характеризується високими фізико-механічними властивостями, відсутністю легкоплавких компонентів, що могли б знизити високотемпературну міцність, а також в'язкістю руйнування. Крім того, він показує високу ефективність при обробці високотвердих сталей, кераміки, має високу твердість, міцність міжфазних і міжзеренних меж, високу дисперсність і рівномірний розподіл структурних компонентів, мінімальний розмір дефектів, які можуть бути джерелами руйнування. Порівняльні дослідження різних ріжучих керамічних матеріалів показують, що основними причинами високої зносостійкості оксидно-карбідної кераміки, зокрема одержаного наноккомпозита, при обробці сталей є ніяк дрібнозерниста структура, а також субструктурний і дисперсний механізм зміцнення. У білій кераміці Al_2O_3 зерна містять дислокації, тобто зерна, не здатні до запасання енергії деформації, внаслідок чого відбувається мікроруйнування зерен Al_2O_3 у поверхневих шарах інструменту. З цього випливає, що підвищення опірності крихкому руйнуванню оксидно-карбідної кераміки і стабільність її ріжучих властивостей можна досягти за рахунок зменшення розмірів зерен матриці, що спостерігається при використанні добавок у вигляді карбідів (TiC , WC , SiC).

Ключові слова: гаряче пресування, електроспінання, інструментальна кераміка, ріжучий матеріал.

Abstract. The article is devoted to the production of tool ceramics from nanodispersed powders of Al_2O_3 – WC by hot vacuum pressing and the study of their properties. The cutting material is obtained by hot pressing by direct transmission of electric current. The developed cutting material is characterised by high physical and mechanical properties, the absence of fusible components that could reduce high-temperature strength, and fracture toughness. In addition, it shows high efficiency in the processing of high-hard steels and ceramics, has high hardness, strength of interfacial and intergranular boundaries, high dispersion and uniform distribution of structural components, and a minimum size of defects that could be sources of fracture. Comparative studies of various cutting ceramic materials show that the main reasons for the high wear resistance of oxide-carbide ceramics, in particular the resulting nanocomposite, in steel

processing are their fine-grained structure, as well as the substructural and dispersed strengthening mechanism. In white Al_2O_3 ceramics, the grains contain dislocations, i.e., the grains are not capable to store the deformation energy, which results in microfracture of Al_2O_3 grains in the surface layers of the tool. It follows that an increase in the resistance to brittle fracture of oxide-carbide ceramics and the stability of its cutting properties could be achieved by reducing the grain size of the matrix, which is observed when using additives in the form of carbides (TiC, WC, SiC). It was found, the optimal sintering temperature of the mixture under pressure is equals to 1600 °C. At a temperature of 1550 °C, the holding time is not sufficient, and at 1650 °C, the temperature of the Al_2O_3 –WC interfacial interaction is exceeded, which could lead to the formation of CO and closed porosity. The pressing pressure is limited by the characteristics of graphite and equals 50 MPa. The maximum pressure is applied only when the maximum pressing temperature is reached to complete degassing of sorbed gases. It has been determined that the grain size of the structural components of ceramics in the range of 2...5 μm is not optimal and is formed not during the sintering process, but during the preparation of the mixture for hot pressing.

Keywords: hot pressing, electrosintering, tool ceramics, cutting material.

Вступ. Багато інструментальних керамічних матеріалів базуються на оксиді алюмінію. Незважаючи на ряд переваг, таких як висока твердість, особливо при високих температурах, хімічна інертність і, отже, висока зносостійкість, а також необмежений доступ до сировинних ресурсів, оксидна кераміка має деякі недоліки, такі як крихкість і низька стійкість до термічних і механічних впливів [1, 2], але попри це матеріали, засновані на оксиді алюмінію, знайшли застосування як ріжучий інструмент для обробки високотвердих сплавів металів та інших матеріалів, що важко обробляються.

Використання гарячого пресування при виробництві оксидної кераміки дало змогу знизити температуру спікання та отримати матеріал із щільністю, близькою до теоретичної. Наприклад, з глинозему різних марок можна отримати зразки з щільністю 98,5...99,5 % при тиску 50 МПа і температурах 1600...1700 °C, навіть з додаванням 0,2...0,4 % MgO. Це дає змогу досягти такої щільності при звичайному спіканні лише при температурі 1800...1900 °C [3].

Процес спікання оксиду алюмінію добре вивчений і залежить від декількох механізмів масопереносу, таких як в'язка течія, пластична деформація,

випаровування-конденсація, об'ємна, зерногранична та поверхнева дифузія [4, 5].

При гарячому пресуванні основними механізмами ущільнення кераміки на останніх етапах процесу є пластична деформація та дифузія. Режим спікання дуже впливає на кінцеві властивості кераміки [6]. Оптимальна температура спікання кераміки залежить від дисперсності вихідного порошку, наявності в ньому домішок, добавок і тривалості нагрівання. Так, при розмірі зерен порошку 0,5...1,0 мкм спікання пластин оксидної кераміки здійснюється при температурі 1710 °C протягом 5...10 хв. При збільшенні температури до 1780...1820 °C витримка може бути скорочена до 1...2 хв. Встановлено, що оптимальними є нетривалі витримки при високих температурах [7].

Структура інструментальної кераміки має такі характеристики: високу щільність матеріалу, міцність міжфазних і міжзеренних меж, високу дисперсність і рівномірний розподіл структурних компонентів, мінімальний розмір дефектів, які можуть бути джерелами руйнування, відсутність легкоплавких компонентів, що могли б знизити високотемпературну міцність, а також високу твердість і опір поширенню тріщин. Механічні характеристики оксидної кераміки залежать від середнього розміру зерен у матеріалі

[8]. Введення 15...30 % карбідів (TiC, WC, Cr₂C₃, Mo₂C) в оксид алюмінію дає змогу покращити механічні характеристики за рахунок додаткового вдосконалення структури. У промисловості найчастіше використовується карбід титану [9]. Порівняльні дослідження кінетики зростання зерен оксиду алюмінію з добавками MgO (0,6 %) і TiC (30 %) показали, що обидва типи добавок знижують зростання зерен при гарячому пресуванні [10, 11].

Керамічний матеріал характеризується ковалентними або іонними зв'язками, що робить його важко піддатливим деформації через сильні взаємодії між атомами [12]. При перевищенні межі міцності в кераміці відбувається крихке руйнування. За теорією Гріффітса [13], міцність крихких матеріалів можна виразити рівнянням $\sigma = K_{Ic} / \sqrt{\pi \cdot C}$, де K_{Ic} – в'язкість руйнування; C – величина пошкодження матеріалу. Щоб знизити крихкість матеріалів (тобто підвищити їхню міцність), необхідно або збільшити K_{Ic} , або зменшити величину C . В'язкість руйнування можна збільшити або підвищенням модуля Юнга, отримавши спечений матеріал з тонкою текстурою, близькою до теоретичної щільності, або збільшенням енергії руйнування, контролюючи структуру та умови випалу, підвищуючи рівномірність структури [14].

Для забезпечення надійності керамічних матеріалів необхідно зменшити їхню варіабельність характеристик [15]. Особливо важливо це для кераміки, використовуваної в машинобудуванні, де надійність підвищується за рахунок скорочення розкиду в міцності матеріалу. Цей розкид пов'язаний з наявністю пор і тріщин у матеріалі, тому для зниження крихкості та створення надійної машинобудівної кераміки часто необхідно усунути навіть найменшу пористість, викликану потраплянням пилу з повітря, на що раніше мало звертали увагу при традиційному виробництві кераміки.

При виробництві машинобудівної кераміки, навіть при використанні тих самих процесів формування та спікання, слід суворо контролювати процес виробництва, щоб уникнути утворення тріщин і залишкових напружень. Ці тріщини можуть виникнути через введення сторонніх частинок (пластифікаторів) у процесі формування і через усадкові явища під час сушіння та випалу. Також необхідно мінімізувати кількість дислокацій, що залишилися в обпалених виробках, і забезпечити їхній рівномірний розподіл [16, 17].

З точки зору цієї проблематики, метод гарячого пресування, застосований без використання пластифікуючих добавок і з мінімальним градієнтом температур вздовж перерізу графітової форми, має значний інтерес.

Конструкція пресів для гарячого пресування залежить від способу нагрівання та застосування тиску, температури пресування, необхідності використання газового захисного середовища або вакууму та інших факторів [18].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [19] дається обґрунтування застосування композиційного матеріалу Al₂O₃-SiC як інструментального. Аналізується та обґрунтовується перевага цього композиційного матеріалу порівняно з матеріалом, що має добавки з SiC-волокон. Розглянуто мікроструктури композитів за різних режимів електроспікання (електроконсолідації). Визначено деякі механічні властивості одержаних композиційних матеріалів методом електроспікання, фазовий склад, дано порівняльну оцінку властивостей і зроблено висновки щодо подальшого поліпшення фізико-механічних властивостей композитів Al₂O₃-SiC, де як добавки використовуються нанопорошки карбиду кремнію.

У роботі [20] розглянуто наномасштабне покриття Al₂O₃, що було виготовлено на мікротекстурованих карбідних ріжучих інструментах YT₅

методом атомарного шарового осадження ALD. Вплив наномасштабного покриття Al_2O_3 , з комбінованою дією текстури та без неї, на ефективність різання вивчали за допомогою випробування ортогонального різання. Результати порівнювалися з ріжучим інструментом із мікротекстурою та ріжучим інструментом YT_5 . Було встановлено, що мікротекстура і наномасштабний Al_2O_3 , нанесений на мікротекстуру, можуть зменшити силу різання та коефіцієнт тертя інструменту, а інструменти з наномасштабним Al_2O_3 , нанесеним на мікротекстуру, є більш ефективними. Отримані результати показали, що розроблені інструменти ефективно зменшують силу різання та коефіцієнт тертя між інструментом і стружкою.

У роботі [21] проведено дослідження, присвячене структурі та механічним властивостям алмазного композита, використовуваного для виготовлення ріжучого інструменту, що застосовується в широкому спектрі технологічних галузей. Зразки інструментів виготовляли за технологією холодного пресування з наступним гарячим пресуванням у вакуумі матричної суміші $51Fe-32Cu-9Ni-8Sn$ (мас.%) з алмазними коронками як за відсутності, так і наявності добавок нано-VN. Було продемонстровано, що без додавання VN поверхня алмаз-матриця містила порожнечі та розриви. Нанодисперсний VN, доданий до матриці, призвів до формування більш дрібнозернистої структури, що складається з твердих розчинів заліза, міді, нікелю, ванадію та олова в різних співвідношеннях, і утворення щільної алмазно-матричної зони без видимих порожнеч, розривів та інших дефектів. Отримані композити $Fe-Cu-Ni-Sn-VN$ з покращеними фізико-механічними властивостями придатні для ріжучих інструментів підвищеної міцності.

У роботі [22] наведено результати досліджень виготовлення та роботи беззв'язувальних наноструктурованих різальних інструментів з карбиду

вольфраму (WC). Наукова новизна полягає в описі деяких закономірностей консолідації порошку під дією електричного струму та подальшій можливості їхнього практичного використання при виготовленні ріжучих інструментів. Процес спікання нанопорошку WC проводили методом електроконсолідації, який є модифікацією іскрового плазмового спікання. Що стосується застосування ріжучих інструментів, чиста наноструктура WC призвела до меншого радіуса ріжучої кромки, що забезпечило вищу якість обробленої поверхні TiC/Fe .

У роботі [23] було досліджено фактори, що впливають на режими видалення матеріалу та гостроту кромки в процесі механічного притирання, і запропоновано новий метод, що поєднує механічне притирання та полірування іонним променем, для досягнення гострої ріжучої кромки нанодвійникового кубічного нітриду бору ($nt-cBN$), що є перспективним інструментальним матеріалом для надточного різання чорних металів. Результати показують, що видалення матеріалу при механічному притиранні в основному відбувається за рахунок транскристалічного пластичного руйнування в нанометровому масштабі. Крім того, висока твердість матеріалу з низьким коефіцієнтом Пуассона і невелика сила удару на ріжучу кромку сприятливі для отримання гострої ріжучої кромки. Тому для загострення механічно притертої ріжучої кромки використовується процес полірування іонним променем. Запропонований спосіб являє собою перспективну стратегію підготовки надгострої ріжучої кромки з низькою вартістю і високою точністю.

У роботі [24] аналізуються і порівнюються переваги та недоліки задіяних технологій і процесів, щоб визначити найбільш відповідні методи створення керамічних різальних інструментів. Паралельно розглядаються останні

вдосконалення керамічних матеріалів для ріжучих інструментів. Показано, що вибір керамічного ріжучого інструменту є досить складним процесом, який потребує врахування ряду важливих факторів.

У роботі [25] досліджено проблему підвищення продуктивності твердосплавної обробки важкооброблюваних матеріалів. Розроблено композиційний матеріал, що містить карбід із термостійкою зв'язкою Co-Re, що значно підвищує стійкість карбіду до термопластичної деформації, і нанодисперсне багат шарове композитне покриття, що значно знижує термомеханічний вплив на ріжучу частину інструменту. Композиційний матеріал при точінні загартованої сталі 40H і жароміцний нікелевий сплав ХН77ТЮР показали свою перевагу порівняно з комерційними карбідами з покриттями сучасного покоління. Показано, що поєднання ультрадисперсних термостійких карбідів WC-(Co, Re) і зносостійких покриттів Ti-TiN-TiCrAlN у кілька разів підвищує ріжучі властивості інструменту.

Отже, проведений аналіз ще раз показує актуальність створення композиційних ріжучих матеріалів, що мають високу зносостійкість і здатні працювати в умовах сухого тертя при обробці високотвердих сталевих сплавів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є отримання наноконпозиційної ріжучої інструментальної оксидно-карбідної кераміки на основі нанодисперсних порошоків за рахунок використання такого високоефективного різновиду гарячого пресування, як електроспінання, що дасть змогу суттєво підвищити стійкість матеріалу до зносу в умовах сухого тертя при обробці високотвердих сплавів.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– визначити оптимальну температуру спікання, тиск і час витримки при максимальній температурі з метою отримання найбільш високих ріжучих властивостей керамічного матеріалу;

– дослідити мікроструктуру отриманих зразків, фізико-механічні, а також технологічні особливості формування та спікання нанопорошкових сумішей методом електроспінання.

Основна частина дослідження.

Матеріали та методи. Під час проведення дослідження для створення пластин використовувалися порошки оксиду алюмінію Al_2O_3 з дисперсністю 0,06 мкм і монокарбіду вольфраму з дисперсністю 0,07 мкм, отримані методом плазмохімії. Мікрофотографії цих нанопорошків наведено на рис. 1.

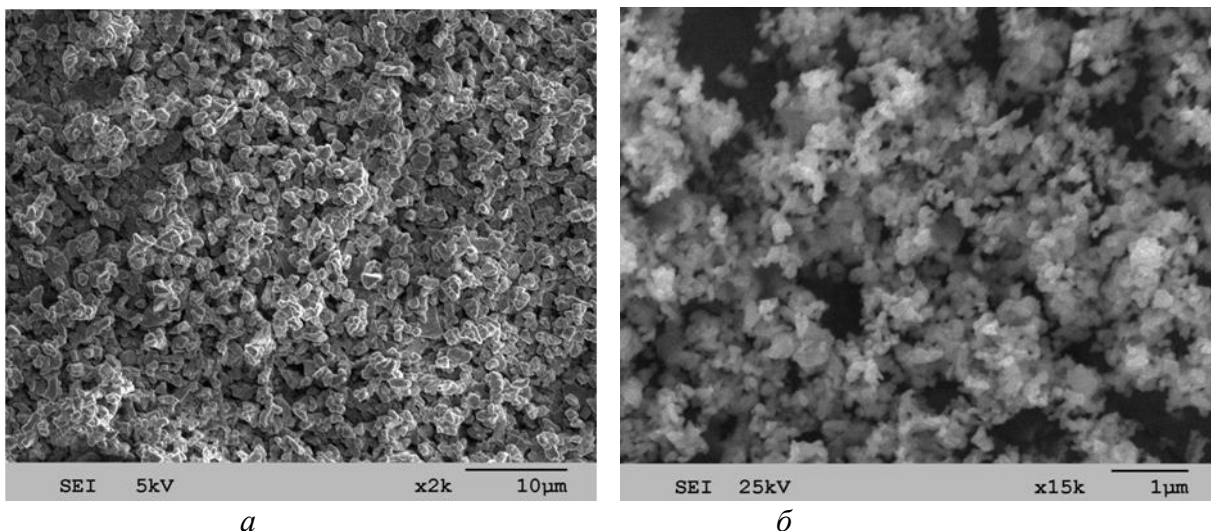


Рис. 1. Мікрофотографії нанопорошків: а – оксиду алюмінію; б – монокарбіду вольфраму

Щільність зразків вимірювалася методом гідростатичного зважування у воді. Структурні дослідження проводилися з використанням растрової електронної мікроскопії (JSM-840) на зламах гарячепресованих зразків, шліфів і вихідних порошків.

Для дослідження фізико-механічних характеристик виготовляли зразки та шліфи з центральної частини матеріалу.

Для вимірювання твердості за шкалою HRA проводили індентування з використанням алмазної піраміди на твердомірі ТМ-12. Межу міцності при згинанні визначали методом триточкового вигину на машині МР-1-0,5.

Процес електроспінання здійснювали на розробленій установці гарячого пресування методом прямого пропускання електричного струму через графітову форму.

У технології твердих сплавів, таких як карбідні сплави для ріжучих інструментів, гирничого обладнання та зносостійких деталей, важливо враховувати твердість і в'язкість матеріалу. За міжнародним стандартом ISO, ці характеристики зазвичай наводяться у зростаючому чи спадному порядку:

– ISO 24370:2005, Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – test method for fracture toughness of monolith hic ceramics at room temperature by chevron-notched beam (CNB) method;

– ISO 18756:2003, Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of fracture toughness of monolith hic ceramics AT room temperature by the surface crack In flexure (SCF) method;

– ISO 15732:2005, Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – test method for fracture toughness of monolithic ceramics at room temperature by single edge precracked beam (SEPB) method.

В'язкість найчастіше визначається як поперечна стійкість до руйнування, і вона часто використовується для характеристики таких сплавів. У промисловості терміни

«в'язкість» і «міцність» іноді використовуються як взаємозамінні для оцінювання стійкості матеріалу до механічних ударів. У той час як поперечна стійкість до руйнування вимірює опір руйнування при триточковому згині, в'язкість є мірою енергії, поглиненої до руйнування. Принципи механіки руйнування дають змогу визначити параметри в'язкості руйнування, які вказують на опір матеріалу руйнуванню за наявності гострих надрізів [26].

Для оцінювання в'язкості спечених карбідних сплавів використовують випробування на розтріскування при індентуванні Палмквіста. Ці випробування дають міру опору розтріскуванню при індентуванні крихких матеріалів і мають переваги порівняно зі звичайними випробуваннями на поперечну стійкість до руйнування, оскільки вони не потребують спеціальних форм зразків, зменшують кількість потрібних зразків і автоматично вимірюють твердість.

Стійкість ріжучих пластин при різанні сталі ШХ15 (HRC-58-60) вимірювали за таких умов: швидкість різання – 400 м/хв, подача – 0,1 мм/оберт, глибина різання – 0,3 мм.

З попередньо таблетованих порошків діаметром 20 мм і масою 9 г виготовлялися зразки для гарячого пресування. Для пресування використовували графіт МПГ-7 з максимальним тиском 50 МПа при температурі вище 1200 °С. Температура початку деформації складала близько 900 °С, а закінчення усадки – 1600...1630 °С. Тому максимальна температура обмежувалася на рівні 1650 °С.

Результати та обговорення. З отриманих зразків виготовляли ріжучі пластини розмірами (11,75×11,75×4,75) мм³ і визначали їхню стійкість при різанні загартованої сталі ШХ15 відповідно до зазначених параметрів. Найкращий результат становив 33 хв, що більш ніж на 30 % перевищує характеристики стандартних пластин ВОК-71. Слід

зазначити, що в обох цих випадках випробування проводилися без застосування мастильно-охолоджувальних рідин, що значно посилює вплив дифузійного та окисного зносу. Імовірно, що застосування мастильно-охолоджувальних рідин дасть змогу знизити температуру в зоні різання і уповільнити дифузійний та окисний знос.

При аналізі структури ВОК-71 та отриманої кераміки виявлено, що розміри зерен складових фаз оксиду алюмінію та

карбідів вольфраму і титану можна порівняти (2...5 мкм). Однак щільність отриманої кераміки 50 мас.% Al_2O_3 –50 мас.% WC становить 5,96 г/см³, що вище, ніж у ВОК-71 (4,2...4,27 г/см³). Це сприяє більш ефективному відведенню тепла з зони різання і, отже, температури у ній. Тож використання добавок WC замість TiC при виробництві ріжучих пластин з оксиду алюмінію є перспективним.

Деякі фізико-механічні властивості отриманих матеріалів наведено в таблиці.

Таблиця

Деякі фізико-механічні властивості отриманих матеріалів

Номер з/п	P , МПа	T , °С	ρ , г/см ³	HRA	σ_{32} , МПа	K_{Ic} , МПа м ^{-1/2}	Стійкість, хв
1	50,0	1550	5,68	92	540	3,5	23
2	50,0	1600	5,96	93	580	5,8	33
3	50,0	1650	5,83	93	560	5,2	28

У разі виготовлення інструменту з нанопорошків «оксид алюмінію – монокарбід вольфраму» відпадає необхідність використання спеціальних зв'язуючих матеріалів у технологічному процесі виготовлення такого інструментального матеріалу. Можливість спікання нанопорошків електричним струмом без добавок, що спікають, значно скорочує технологічний цикл виготовлення пластин і перешкоджає утворенню додаткових джерел тріщин і пор. Швидке підвищення температури в процесі гарячого пресування обмежує зростання зерна.

Відомо, що дисперсне зміцнення матеріалів визначається морфологією та розміром частинок зміцнювальної фази, її вмістом і міцністю міжфазних меж [27]. Міцність міжфазних меж залежить від відношення модулів пружності зміцнювальної фази і матриці коефіцієнтів їхнього термічного розширення, а також рівня розчинності зміцнювальної фази в матриці. Чим більше відношення модулів пружності матриці та зміцнювальних фаз,

тим вища концентрація напружень на міжфазній межі. Карбід вольфраму створює в оксидній матриці більшу концентрацію напружень на міжфазній межі, ніж карбід або нітрид титану. Крім того, зерна WC більш дисперсні, тому більш когерентні з матрицею. Отже, високу зносостійкість під час обробки загартованих сталей можна пояснити вищою міцністю міжфазних меж.

Можливість протікання та види реакції між оброблюваним матеріалом і структурними складовими ріжучої кераміки можна прогнозувати на основі розрахунку термодинамічного потенціалу. Дослідження показали, що температура в зоні різання в тонких поверхневих шарах може досягати температури фазових перетворень заліза ($Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma$). Високий тиск ініціює дисоціацію цементиту. Отже, основними елементами, якими можуть дифундувати поверхневі шари кераміки, можуть бути іонізовані залізо і вуглець, оскільки вони знаходяться в аустеніті. Однак розрахунки показують, що для реакції

$$Al_2O_3 + 2Fe \rightarrow 2Al + Fe_2O_3$$

термодинамічний потенціал має позитивне значення в широкому діапазоні температур, і реакція енергетично не вигідна.

Реакції з вуглецем вигляду $2\text{Al}_2\text{O}_3 + 9\text{C} \rightarrow \text{Al}_4\text{C}_3 + 6\text{CO}$ можливі при температурах $> 1800^\circ\text{C}$, що знаходиться за межами робочих температур ріжучого інструменту. При температурах $1100\dots 1300^\circ\text{C}$ можливі реакції Al_2O_3 з кремнієм, марганцем і кальцієм (їхніми оксидами), що містяться в сталі. Дані рентгеноспектрального аналізу не виявляють карбідів та чисті Fe та Al у стружці та оброблюваному матеріалі, як результат можливого відновлення їхніх оксидів. Однак у нашаруваннях з оброблюваного матеріалу на контактних майданчиках виявляються оксиди FeO та Fe_2O_3 . Аналіз структури керамічних матеріалів ВО-13, ВОК-60, ВОК-71 та ОНТ-20 з використанням електронної мікроскопії показує, що цей клас

інструментальних матеріалів можна розглядати як дисперсно-зміцнені матеріали. Залежно від марки кераміки її матриця зміцнена частинками оксидів, карбідів (ZrO_2 , TiC і т. д.). Зміцнення розробленого матеріалу відбувається за рахунок додавання частинок карбиду вольфраму. У кераміці ВО-13 розміри частинок Al_2O_3 перевищують 3 мкм. В оксидно-карбідній кераміці розміри зерен Al_2O_3 досягають $2\dots 5$ мкм, а TiC – $0,2\dots 0,7$ мкм. Розмір зміцнювальних частинок розробленого матеріалу становить $50\dots 100$ нм. Вміст зміцнювальних частинок (TiC , TiN , SiC і т. д.) у кераміці різний: якщо, наприклад, в оксидно-карбідній кераміці ВОК-60 він досягає 40 мас.%, то в розробленому матеріалі – лише 15 мас.%.

На рис. 2 показано залежність зносу h , мм, різних матеріалів від тривалості роботи t , хв, різних ріжучих матеріалів.

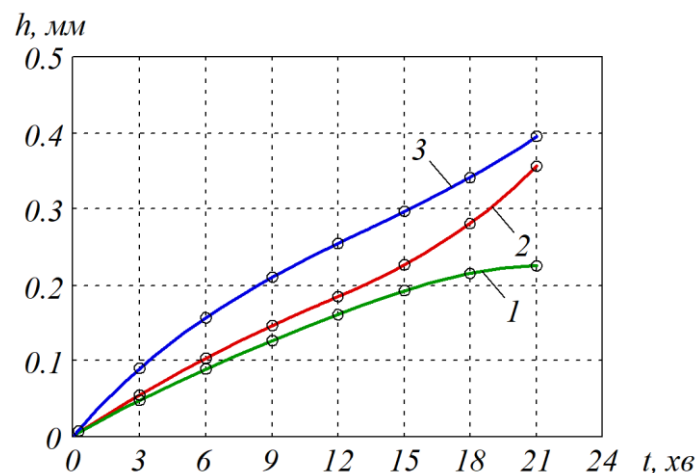


Рис. 2. Залежність зношування по задній поверхні від тривалості обробки сталі ШХ15 (HRC 60...62) пластинами: 1 – з Al_2O_3 –50 мас.% WC; 2 – ВОК-71; 3 – ВО-13 (режим різання: $v \times s \times t = 200$ м/хв \times 0,085 мм/об \times 0,2 мм)

Найбільше зношування відбувається в ріжучого матеріалу без зміцнювальних добавок, яке ще раз доводить, що дисперсне зміцнення композитів позитивно впливає на фізико-механічні властивості матеріалів.

Отже, проведені дослідження показали, що для отримання ріжучих пластин Al_2O_3 –WC з високою функціональною ефективністю необхідно оптимізувати співвідношення фазових складових вихідних порошків і їхню

гомогенізацію в процесі змішування. Далі слід провести формування методом гарячого вакуумного пресування при оптимальних режимах, а також полірування ріжучих пластин, щоб виключити зародки мікротріщин. Нарешті необхідно оптимізувати параметри різання для різних металів і сплавів.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень структури і властивостей отриманої оксидно-карбідної інструментальної кераміки можна зробити такі висновки:

– оптимальна температура спікання суміші під тиском складає 1600 °С. При температурі 1550 °С час витримки недостатній, а при 1650 °С перевищується температура міжфазної взаємодії Al_2O_3 –WC, що може спричинити утворення CO та закритої пористості. Тиск

пресування обмежується характеристиками графіту МПГ-7 і становить 50 МПа. Максимальний тиск застосовується тільки при досягненні максимальної температури пресування для повної дегазації сорбованих газів. Застосування максимального тиску при більш низьких температурах може призвести до збільшення пористості через наявність сорбованих газів;

– розміри зерен структурних складових кераміки в діапазоні 2...5 мкм не є оптимальними і формуються не в процесі спікання, а під час підготовки суміші до гарячого пресування. Очевидно, що сухе змішування не сприяє руйнуванню агломерату Al_2O_3 і WC і не дає змоги отримати гомогенну структуру, що важливо для отримання субмікронних зерен при спіканні. Можливо, необхідно використовувати мокре змішування з застосуванням поверхнево-активних речовин.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Використання нетрадиційних методів отримання нанопорошків і спікання при розробці модифікованої муліто- ZrO_2 кераміки, стійкої до термоудару» (державний реєстраційний номер 0121U1094401).

Список використаних джерел

1. Wang D., Xue C., Cao Y., Zhao J. (2016). Fabrication and cutting performance of an $Al_2O_3/TiC/TiN$ ceramic cutting tool in turning of an ultra-high-strength steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 91(5–8). P. 1967–1976. DOI: 10.1007/s00170-016-9927-z.
2. Shalaby M. A., Veldhuis S. C. (2018). Wear and tribological performance of different ceramic tools in dry high speed machining of Ni-Co-Cr precipitation hardenable aerospace superalloy. *Tribology Transactions*. 2018. Vol. 62. P. 62–77. DOI: 10.1080/10402004.2018.1486494.
3. Нові керамічні композиційні матеріали інструментального призначення: монографія / Р. В. Вовк, Е. С. Геворкян, В. П. Нерубацький та ін. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2018. 200 с.
4. Геворкян Е. С., Нерубацький В. П. Моделювання процесу гарячого пресування Al_2O_3 при прямому пропусканні змінного електричного струму з частотою 50 Гц. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 110. С. 45–52.
5. Геворкян Е. С., Нерубацький В. П. До питання отримання тонкодисперсних структур з нанопорошків оксиду алюмінію. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 111. С. 151–167.

6. Лісачук Г. В., Кривобок Р. В., Волощук В. В. Інтенсифікація процесу спікання керамічних матеріалів на основі системи $BaO-Al_2O_3-SiO_2$. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів*. 2022. № 1. С. 3–8. DOI: 10.20998/2220-4784.2022.01.01.
7. Denry I., Kelly J. R. Emerging ceramic-based materials for dentistry. *Journal of Dental Research*. 2014. Vol. 93(12). P. 1235–1242. DOI: 10.1177/0022034514553627.
8. Давидчук Н. К., Гадзира М. П., Тимошенко Я. Г., Гнилиця І. Д. Вплив продуктів взаємодії високодисперсних карбідів з оксидами металів на структуру та міцність зерен спеченої алюмооксидної кераміки. *Вісник УМТ*. 2017. № 1(10). С. 81–87.
9. Mohapatra S. A review on titanium carbide synthesising methods. *Materials Science: An Indian Journal*. 2021. Vol. 19, Is. 6. P. 1–10.
10. Szutkowska M. Fracture toughness of advanced alumina ceramics and alumina matrix composites used for cutting tool edges. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2012. Vol. 54/2. P. 202–210.
11. Dobrzański L. A., Kremzer M., Nagel A., Huchler B. Fabrication of ceramic preforms based on Al_2O_3 CL 2500 powder. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2006. Vol. 18. No. 1–2. P. 71–74.
12. Vaiani L., Boccaccio A., Uva A. E., Palumbo G., Piccininni A., Guglielmi P., Cantore S., Santacroce L., Charitos I. A., Ballini A. 2023. Ceramic materials for biomedical applications: an overview on properties and fabrication processes. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023. Vol. 14, No. 3. 146. DOI: 10.3390/jfb14030146.
13. Zehnder, A.T. (2013). Griffith theory of fracture. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) *Encyclopedia of Tribology*. Springer, Boston, MA. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_259.
14. Нові матеріали та технології їх отримання: підручник / Е. С. Геворкян, Г. Д. Семченко, Л. А. Тимофеева, В. П. Нерубацький. Харків: «Діса плюс», 2015. 344 с.
15. Iqbal A., Moskal G. Recent development in advance ceramic materials and understanding the mechanisms of thermal barrier coatings degradation. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023. DOI: 10.1007/s11831-023-09960-7.
16. F. T. da Silva, M. A. N. Zacché, H. S. de Amorim Influence of different surface treatments on the fracture toughness of a commercial ZTA dental ceramic. *Materials Research*. 2007. Vol. 10, No. 1. P. 63–68. DOI: 10.1590/S1516-14392007000100014.
17. Gevorkyan E., Rucki M., Krzysiak Z., Chishkala V., Zurowski W., Kucharczyk W., Barsamyan V., Nerubatskyi V., Mazur T., Morozow D., Siemiątkowski Z., Caban J. Analysis of the electroconsolidation process of fine-dispersed structures out of hot pressed Al_2O_3-WC nanopowders. *Materials*. 2021. Vol. 14, Is. 21. 6503. DOI: 10.3390/ma14216503.
18. Hu C., Li F., Qu D., Wang Q., Xie R., Zhang H., Peng S., Bao Y., Zhou Y. Developments in hot pressing (HP) and hot isostatic pressing (HIP) of ceramic matrix composites. *Advances in Ceramic Matrix Composites*. 2014. P. 177–202. DOI: 10.1016/b978-0-08-102166-8.00008-6.
19. Gevorkyan E. S., Rucki M., Kagramanyan A. A., Nerubatskiy V. P. Composite material for instrumental applications based on micro powder Al_2O_3 with additives nano-powder SiC. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019. Vol. 82. P. 336–339. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.05.010.
20. Tang S., Liu P., Su Z., Lei Y., Liu Q., Liu D. Preparation and cutting performance of nano-scaled Al_2O_3 -coated micro-textured cutting tool prepared by atomic layer deposition. *High Temperature Materials and Processes*. 2021. Vol. 40(1). P. 77–86. DOI: 10.1515/htmp-2021-0021.
21. Mamalis A., Mechnik V., Morozow D., Ratov B., Kolodnitskyi V., Samociuk W., Bondarenko N. Properties of cutting tool composite material diamond-(Fe-Ni-Cu-Sn) reinforced with nano-VN. *Machines*. 2022. Vol. 10, No. 6. 410. DOI: 10.3390/machines10060410.

22. Gevorkyan E., Rucki M., Sałaciński T., Siemiątkowski Z., Nerubatskyi V., Kucharczyk W., Chrzanowski Ja., Gutsalenko Yu., Nejman M. Feasibility of cobalt-free nanostructured WC cutting inserts for machining of a TiC/Fe composite. *Materials*. 2021. Vol. 14, Is. 12. 3432. DOI: 10.3390/ma14123432.
23. Wang J., Chen J., Jin T., Guo B., Yuan J., Zhao Q. Preparation of nanotwinned cBN cutting edge by combining mechanical lapping and ion beam polishing. *Diamond and Related Materials*. 2020. 107801. DOI: 10.1016/j.diamond.2020.107801.
24. Grigoriev S. N., Fedorov S. V., Hamdy K. Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools – a review. *Manufacturing Rev.* 2019. Vol. 6, No. 19. DOI: 10.1051/mfreview/2019016.
25. Vereschaka A. A., Vereshchaka A. S., Anikeev A. I. Carbide tools with nano-dispersed coating for high-performance cutting of hard-to-cut materials. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 871. P. 164–170. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.871.164.
26. Menčík J. Principles of fracture mechanics. In: *Mechanics of Components with Treated or Coated Surfaces. Solid Mechanics and Its Applications*. 1996. Vol. 42. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-015-8690-0_4.
27. Remanufacturing and Advanced Machining Processes for New Materials and Components / E. S. Gevorkyan, M. Rucki, V. P. Nerubatskyi, W. Żurowski, Z. Siemiątkowski, D. Morozow, A. G. Kharatyan. Taylor & Francis, 2022. 204 p.
-

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Геворкян Едвін Спартакович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 756-98-03. E-mail: komarova@kart.edu.ua. ORCID iD: 0000-0001-8597-5891.

Морозова Оксана Миколаївна, аспірантка кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (097) 170-62-95. E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Цибульник Владислав Романович, молодший науковий співробітник кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 945-95-75. E-mail: vladtsybulnyk@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-9895-6662.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Gevorkyan Edwin Spartakovich, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Komarova Hanna Leonidivna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 756-98-03. E-mail: komarova@kart.edu.ua. ORCID iD: 0000-0001-8597-5891.

Morozova Oksana Mykolaivna, Postgraduate, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (097) 170-62-95. E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Tsybulnyk Vladyslav Romanovych, Junior research fellow, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 945-95-75. E-mail: vladtsybulnyk@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-9895-6662.

Статтю прийнято 16.09.2023 р.

УДК 534.6-8

РОЗПОВСЮДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХВИЛЬ У ДВОВИМІРНОМУ ШАРУВАТОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Асист. О. В. Казанко, старш. викл. О. Є. Пенкіна

PROPAGATION OF MECHANIC WAVE IN TWO-DIMENSION STRATIFIED MEDIUM

Assistant A. Kazanko, senior lecturer O. Penkina

***Анотація.** Принцип емерджентності підштовхує шукати нові властивості майбутніх матеріалів унаслідок структуризації складових елементів, причому переважно йдеться про неочевидну структуризацію. Наприклад, розуміння та імітація ізотропії лежить на шляху до стійкості до внутрішніх коливань. Сама по собі структурність є характерною рисою світу, що оточує людину (молекули білків, кристалічні решітки тощо). Проте різноманіття природних структур настільки численне, що безпосереднє вивчення їх щодо виявлення нових властивостей, мабуть, виявляється доволі складним завданням. Тому певною мірою принцип емерджентності ніби протиставляє необхідності копіювати або імітувати природні структури можливості здійснювати, винаходити. Подібно до того, як в оптичному калейдоскопі утворюється безліч різних візерунків завдяки двом або трьом оптичним елементам, принцип емерджентності дає підстави очкувати, що внаслідок структуризації лише декількох складових майбутнього середовища можуть бути отримані нові властивості.*

Розвиток технології, зокрема 3D-друк, відкриває можливості по-новому подивитися на методологію структуризації середовища. Якщо на додачу цей процес є відносно економічним, то емпіричним шляхом, здійснюючи структуризацію, можна отримувати експериментальні лабораторні зразки. Сьогодні говорять про можливість досягнути таких ефектів, як лінзування механічних хвиль саме завдяки емерджентним властивостям. Відповідні пристрої обіцяють знайти своє застосування, наприклад, в ультразвуковій діагностиці в медицині (доц. Ж. Мемолі Сасекського університету, Великобританія).

У роботі розглядається задача про розповсюдження механічних хвиль у складеному періодичному двошаровому середовищі – плоска модель. Для такого середовища записується хвильове рівняння, яке розв'язується методом розділення змінних. Таким рівнянням виявляється лінійне диференціальне рівняння з періодичними кусково-сталими коефіцієнтами. Із загальної теорії диференціальних рівнянь з періодичними коефіцієнтами (теорії Флоке) добре відомий метод матриць перенесення (метод розрахунку проходження хвиль через багатошарові середовища), що дає змогу отримати складову умову розв'язності хвильового рівняння. У роботі розвивається підхід отримання умов розв'язності (побудову дисперсійного рівняння) разом із класичним методом матриць перенесення. Запропонований підхід у певному сенсі еквівалентний методу матриць перенесення, проте має деякі чудові відмінності, зокрема дає строге математичне підґрунтя для переходу до середовищ з кінцевою кількістю шарів.

***Ключові слова:** пружне середовище, шарувате середовище, метод матриць перенесення, скалярне хвильове рівняння, розповсюдження хвиль, ефект лінзування.*

Abstract. *The principle of emergence encourages us to look for new properties in future materials as a result of structuring of constituent elements, and mostly we are talking about non-obvious structuring. For example, understanding and simulating isotropy is on the way to robustness against internal vibrations. Structurality itself is a characteristic feature of the world around a person (protein molecules, crystal lattices, etc.). However, the variety of natural structures is so numerous that directly studying them to identify new properties appears to be quite a difficult task. Therefore, to a certain extent, the principle of emergence supposedly contrasts the need to copy or imitate natural structures with the ability to carry out inventions. Just as a wide variety of patterns are formed in an optical kaleidoscope thanks to 2 or 3 optical elements, the principle of emergence gives reason to expect that as a result of structuring only a few components of the future environment, new properties can be obtained.*

The development of technology, in particular, 3D printing, opens up opportunities to look at the methodology of structuring the environment in a new way. If, in addition, this process is relatively economic, then empirically, by carrying out structuring, it is possible to obtain experimental laboratory samples. Today they are talking about the possibility of achieving such effects as lensing of mechanical waves precisely thanks to emergent properties. The corresponding devices promise to find application, for example, in ultrasound diagnostics in medicine (Assoc. Prof. J. Memoli, University of Sussex, UK).

The paper considers the problem of the propagation of mechanical waves in a folding periodic two-layer medium - a flat model. For such a medium, a wave equation is written and solved by the method of separation of variables. Such an equation turns out to be a linear differential equation with periodic piecewise-stable coefficients. From the basic theory of differential equations with periodic coefficients (Floquet theory), the method of transfer matrices (a method for calculating the passage of waves through multilayer media) is well known, which makes it possible to obtain a composite condition for the solvability of the wave equation. The work develops an approach to obtaining solvability conditions (constructing a dispersion equation) along with the classical method of transfer matrices. The proposed approach is in a certain sense equivalent to the transfer matrix method, however, it has some remarkable differences, in particular, it provides a rigorous mathematical basis for the transition to media with a finite number of layers.

Keywords: *elastic environment, layered medium, transfer matrix method, scalar wave equation, propagation of waves, lensing effect.*

Вступ. Певною мірою просування науково-технічного прогресу розумно пов'язувати з пошуками матеріалів, що мають нові електромагнітні, механічні та інші властивості. Мабуть, не дарма цілі культурно-історичні періоди розвитку людства асоціюються саме з назвами матеріалів – кам'яна, мідна, бронзова доба. Та не дивлячись на досягнення в цьому напрямі, науково-технічний поступ і нові галузі науки спричиняють нові потреби у сфері пошуку раніше нереалізованих властивостей матеріалів. Власне, актуальними залишаються потреби якісного підвищення таких властивостей,

як біологічна інертність (протезування в медицині), стійкість до корозії (будівництво), стійкість до трансформації (будівництво); високоімпедансні властивості (графен, вуглецеві трубки) водовідштовхувальні властивості, електропровідність і багато інших. Згадуючи фізичний принцип близькодії, справедливо стверджувати, що властивості матеріалів відображують закони розповсюдження хвиль: шумоізоляційні, звукофільтрувальні властивості, теплопровідні, теплоізоляційні, стійкість до руйнування внаслідок збурення коливань певної частоти (інженерні споруди, мости).

Один зі шляхів відкривати і виявляти нові властивості матеріалів полягає в спробах імітувати різні наявні у природі структури: це можуть бути структури кристалічних решіток, високоорганізованих молекул (білки) тощо. Чимало цікавих винаходів, з точки зору нових властивостей, було взято з живої природи: крила (надкрильники) комах, метеликів, листя рослин і багато чого іншого. Проте різноманіття природних структур настільки велике, що сама по собі розмаїтість створює проблеми в систематизації та класифікації природних структур і встановленні зв'язку між структурою та шуканою властивістю.

На рис. 1–2 подано дискретні неочевидно структуровані середовища, які мають ізотропію в декількох напрямках. Як відомо, усередині однорідного та ізотропного середовища вторинні хвилі взаємознищуються. Розуміння та імітація ізотропії лежить на шляху до стійкості стосовно внутрішніх коливань.

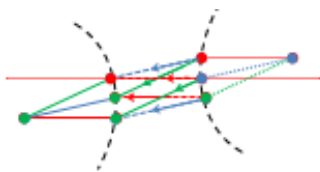


Рис. 1. Двовимірна модель дискретного середовища з трьома напрямками ізотропії

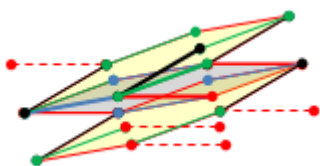


Рис. 2. Двовимірна модель дискретного середовища з чотирма напрямками ізотропії

Разом із імітацією природних структур існує ще один прийом пошуку нових (точніше потрібних або нових застосувань) властивостей матеріалів, який

полягає у спробах здійснювати структурування потенційного матеріалу методом спроб і помилок (емпіричним шляхом) і, отже, робити ставку на принцип емерджентності (від англ. emergent «виникаючий» – поява в системі властивостей, не притаманних окремим складовим компонентам; незведеність властивостей системи до суми властивостей кожного окремого компонента).

Тобто сама по собі структурація може (принцип емерджентності) призводити до появи нових властивостей. Існує чимало прикладів емерджентних властивостей відповідно структурованих матеріалів, одні з яких знаходять своє місце у виробництві, як-от антипригарні поверхні (у харчовому господарстві – Duramic, являє собою поєднання титану та кераміки), а інші чекають свого впровадження в масове виготовлення – звуковий прожектор доц. Ж. Мемолі Сасекського університету, Великобританія, 2019 р.). Ще одним прикладом матеріалу з емерджентними властивостями є вуглеволоконний композит, у якому поліпшення міцнісних характеристик досягається шляхом перемежування саме вуглецевого волокна з шарами-затверджувачами.

Отже, принцип емерджентності передрікає появу нових властивостей матеріалів внаслідок структурації, тому вивчення механічних властивостей і рефлексивної поведінки у відповідь на механічне збурення може сприяти появі нових властивостей, практичних застосувань або стати відправним пунктом у подальших пошуках нових властивостей.

У статті розглянуто задачу про розповсюдження механічних хвиль у складеному періодичному шаруватому середовищі (рис. 3) – двовимірна модель (подібні моделі середовища використовуються в акустиці при лінзуванні звукових хвиль – звуковий прожектор, цеглові будови, шпали тощо). Для складеного періодичного шаруватого

середовища записується хвильове рівняння, яке розв'язується методом розділення змінних. Таким рівнянням виявляється рівняння з кусково-сталими коефіцієнтами (модифіковане рівняння Гельмгольца). Щоб вписатися в умови розв'язності рівняння, використовують відомий з загальної теорії рівнянь з періодичними коефіцієнтами (теорії Флоке) метод матриць перенесення (transfer matrix method, ММП).

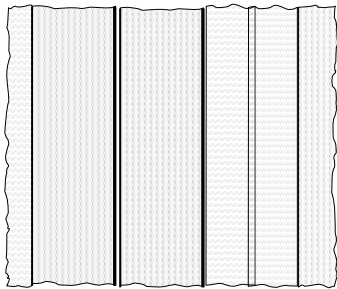


Рис. 3. Модель двовимірного необмеженого шаруватого середовища

На думку авторів, на увагу заслуговує підхід, який також дає змогу отримати умову на періоді (дисперсійне рівняння), дає строге математичне підґрунтя для деяких модифікацій вихідного середовища, зокрема переходити до середовищ з кінцевою кількістю шарів (у середовищах з кінцевою кількістю шарів довжина кожного шару може бути неоднаковою). У роботі дано доведення еквівалентності підходу та методу ММП. Хоча має місце еквівалентність, проте слід зазначити, що таке положення речей досить неочевидне. Такий метод більш адаптований до хвильового рівняння з кусково-сталими коефіцієнтами та не може застосовуватися до звичайних диференціальних рівнянь (з неперервними коефіцієнтами). Говорячи про еквівалентність методів, важливо підкреслити, що простір допустимих розв'язків звичайного рівняння вужче, ніж простір допустимих розв'язків рівняння з кусково-сталими коефіцієнтами. Логіка, яка

«спрацьовує» на меншій множині, може не спрацьовати на ширшій множині, тому еквівалентність методів дійсно неочевидна. Метод ММП використовується для звичайних диференціальних рівнянь з безперервними періодичними коефіцієнтами (рівнянь Хіла) і розповсюджується також на рівняння з кусково-сталими коефіцієнтами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розглядається періодичне кінцеве середовище, відшукуються розв'язки методом ММП; одновимірні хвилі диференціального рівняння однієї незалежної змінної (рівняння з періодичними коефіцієнтами) і будуються лінійно незалежні розв'язки – хвилі Флоке-Блоха. Розглянуто питання повноти системи цих розв'язків. Відомо, що скалярне хвильове рівняння є наслідком рівнянь Максвелла – векторних рівнянь, що описують коливальні процеси розповсюдження в загальному вигляді. У роботі [2] з рівнянь Максвелла виводиться хвильове рівняння для середовища з кусково-сталім матеріальним показником. У роботі [3] використовується метод ММП для чисельного експериментування розповсюдження хвиль у шаруватому середовищі для вивчення ефекту лінзування акустичних хвиль (звуковий прожектор).

Запишемо скалярне хвильове рівняння для плоского періодичного необмеженого шаруватого середовища [2]:

$$\Delta_{\mu} u + k^2 n^2 u = 0, \quad (1)$$

де $\Delta_{\mu} = \mu \nabla \frac{1}{\mu} \nabla$ – модифікований оператор Лапласа,

де $\mu = \mu(z)$ – матеріальна характеристика середовища – виникає при переході від векторного до скалярного хвильового рівняння, пов'язана з розташуванням системи координат і площиною коливання точок середовища – є кусково-сталою функцією вздовж незалежної змінної z та сталою від u ,

$$\mu(z) = \begin{cases} \mu_1, & z \in (\frac{d}{2}-l+ml, -\frac{d}{2}+ml] \\ \mu_2, & z \in (-\frac{d}{2}+ml, \frac{d}{2}+ml] \end{cases},$$

де m – ціле. За методом розділення змінних загальний розв’язок подається у вигляді ряду Фур’є (в ортогональних системах координат). Тож, маємо $u = \sum_n Y_{\beta_n} Z_{\beta_n}$, де Z_{β_n} – повна ортогональна система функцій, причому елемент $Z_{\beta_n} = Z_{\beta_n}(z)$ задовольняє рівняння $\mu(\frac{1}{\mu} \dot{Z}) + (k^2 n^2 + \beta^2)Z = 0$, $Y_{\beta_n} = Y_{\beta_n}(y)$ – розв’язок (коефіцієнти Фур’є) звичайного лінійного диференціального рівняння другого порядку $\dot{Y}_{\beta_n} + \beta_n^2 Y = 0$, має вигляд $Y_{\beta_n}(y) = C_{\beta_n} e^{\beta_n y} + D_{\beta_n} e^{-\beta_n y}$, C_{β_n} , D_{β_n} – довільні константи, $n = 0, \pm 1, \dots$;

$u = u(z, y)$ – шукана скалярна функція, $z, y \in (-\infty, +\infty)$;

k – скалярний хвильовий показник (частотна характеристика);

$n = n(z)$ – матеріальний показник середовища є кусково-сталою функцією вздовж незалежної змінної z та сталою від y ,

$$n(z) = \begin{cases} n_1, & z \in (\frac{d}{2}-l+ml, -\frac{d}{2}+ml] \\ n_2, & z \in (-\frac{d}{2}+ml, \frac{d}{2}+ml] \end{cases}.$$

Задача про побудову системи Z_{β_n} , $n = 0, \pm 1, \dots$ називається проблемою Штурма-Ліувілля та може розв’язуватися як спектральна проблема для лінійного диференціального оператора другого порядку:

$$LZ = -\beta^2 Z, \quad (2)$$

де $LZ \equiv \mu(\frac{1}{\mu} \dot{Z}) + k^2 n^2 Z$ – лінійний диференціальний оператор другого порядку;

β – спектральний параметр.

Питанням розв’язності проблеми Штурма-Ліувілля присвячується доволі чимала теорія. Досить вичерпано ця

проблема розбирається в математичній фізиці [4, 5], спектральній теорії диференціальних операторів [6], загальній теорії диференціальних рівнянь у часткових похідних. Один з методів, що дає змогу отримати складову умову розв’язності проблеми Штурма-Ліувілля для лінійних диференціальних рівнянь другого порядку з періодичними коефіцієнтами (рівнянь Хіла), ґрунтується на можливості встановити лінійний зв’язок між розв’язком $u(z)$ і $u(z-l)$ – метод матриць перенесення (transfer matrix method, ММП).

Зупинимось коротко на цьому методі (метод дає змогу отримати умови на періоді, тобто досягти виконання умови самоспряженості диференціального оператора у спектральній проблемі) і, отже, вписатися в умови розв’язності проблеми Штурма-Ліувілля [1]. Справа в тому, що оператор, який розв’язку $u(z)$ ставить у відповідність розв’язок $u(z-l)$, є лінійним оператором, що діє у двовимірному просторі розв’язків спектрального диференціального рівняння $LZ = -\beta^2 Z$ [7], тож задається квадратною матрицею розміром 2×2 (лінійність такого оператора перевіряється безпосередньо за визначенням). Якщо поставити задачу на власні числа для цього оператора, то відповідні власним числам функції матимуть вигляд $\Lambda u(z-l) = u(z)$, $\Lambda = \Lambda_\beta$ – власне число (число Λ_β називають множителем Флоке), допомагають зрозуміти, якими мають бути умови на періоді.

Нехай $T: u(z) \rightarrow u(z-l)$, u – розв’язок спектрального рівняння $LZ = -\beta^2 Z$ і $Tu = \Lambda u$ – задача на власні числа для оператора T . Оскільки оператор T задається матрицею розміром 2×2 , то власні числа є розв’язками квадратного рівняння $\det(T - \Lambda I) = 0$. Елементи матриці T відносно фундаментальної системи розв’язків u_1, u_2 спектрального рівняння $LZ = -\beta^2 Z$ неважко знаходяться, якщо система u_1, u_2 є нормальною системою відносно заданої точки $z = z_0$.

Тож у координатній формі матриця перенесення має вигляд [1, 8, 9]

$$T = \begin{pmatrix} u_1|_{z_0-l} & u_2|_{z_0-l} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0-l} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0-l} \end{pmatrix}.$$

Відповідно квадратне рівняння $\det(T - \Lambda I) = 0$ у координатній формі набуває вигляду

$$\Lambda^2 - \Lambda \left(\frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0-l} + u_1|_{z_0-l} \right) + 1 = 0. \quad (3)$$

Останнє рівняння пов'язує спектральний параметр β з власними числами Λ (дисперсійне рівняння). З практичної точки зору метод матриць перенесення цікавий тим, що для побудови матриці перенесення T досить мати розв'язки u_1, u_2 на проміжку $[z_0 - l, z_0]$, тобто необов'язково мати розв'язки на всій числовій осі $(-\infty, +\infty)$ [10].

Визначення мети та завдання дослідження. На думку авторів, на увагу заслуговує підхід, який разом з методом ММП також дає змогу отримати умову на періоді (дисперсійне рівняння) – складову умовою розв'язності проблеми Штурма-Ліувілля. Цей підхід більш адаптований до рівнянь з періодичними кусково-сталими коефіцієнтами. Тому дисперсійне рівняння (3) може описувати дещо інші розв'язки – множина може бути ширшою. Отже, ця робота спрямована на докладне вивчення питання про еквівалентність нижченаведеного підходу та методу ММП. Крім того, при побудові матриці перенесення використовується точка нормалізації z_0 , яка також присутня в дисперсійному рівнянні (3). Якщо ця точка припадає на границю розподілу середовищ, то самі фундаментальні розв'язки u_1, u_2 виявляються залежними від вибору точки z_0 , оскільки тут знижуються диференціальні якості функцій u_1, u_2 , а це також означає залежність від вибору системи координат. Отже, справедливо виникає питання про залежність

спектрального рівняння від вибору точки нормалізації z_0 .

Основна частина дослідження.

Виділимо для визначеності деякий інтервал, що відповідає періоду вихідного механічного середовища – $\left(\frac{d}{2} - l, \frac{d}{2}\right)$. Нехай u_1, u_2 – лінійно незалежні розв'язки спектрального рівняння (2) у цьому інтервалі $\left(\frac{d}{2} - l, \frac{d}{2}\right)$. По суті, з огляду на періодичність середовища, ці функції u_1, u_2 є розв'язками в кожному такому інтервалі $\left(\frac{d}{2} - l + ml, \frac{d}{2} + ml\right)$, m – ціле, і можуть розглядатися як періодичні функції зі стрибками в кінцях проміжку (наявність стрибку в кінцях проміжку не дає змогу вважати функції u_1, u_2 розв'язками на інтервалі $(-\infty, +\infty)$).

На думку авторів, на увагу заслуговує підхід, який також дає змогу отримати умову на періоді (дисперсійне рівняння). Автори вважають, що разом з методом матриць перенесення наступний підхід має декілька чудових рис. Фундаментальні розв'язки u_1, u_2 необов'язково мають утворювати нормальну систему. Незалежність вибору точки нормалізації z_0 . Вихідне хвильове рівняння ніби розв'язується на кожному інтервалі окремо. Ця відмінність дає строге математичне підґрунтя для переходу від необмеженої структури до структури з кінцевою кількістю шарів. За підходом цієї роботи, дисперсійне рівняння виражається через функцію Z_β :

$$\frac{1}{\mu} \dot{Z}_\beta \Big|_{\frac{d}{2}} - \frac{1}{\mu} \dot{Z}_\beta \Big|_{\frac{d}{2}-l} \equiv \frac{1}{\mu} \dot{Z}_\beta \Big|_{\frac{d}{2}} = 0.$$

Проте слід зазначити, що такий підхід неможливо застосувати до звичайних диференціальних рівнянь з непервинними коефіцієнтами. Нижче наводиться опис та доведення еквівалентності.

Утворимо з розв'язків u_1, u_2 лінійну комбінацію

$$Z_\beta = (u_2^+ - \Lambda u_2^-)u_1 - (u_1^+ - \Lambda u_1^-)u_2, \quad (4)$$

де $u_1^- = u_1(\frac{d}{2} - l)$, $u_1^+ = u_1(\frac{d}{2})$, $u_2^- = u_2(\frac{d}{2} - l)$, $u_2^+ = u_2(\frac{d}{2})$;

Λ – деяке комплексне число.

Запишемо похідну Z_β (будемо використовувати апарат дельта-функції Дірака)

$$\dot{Z}_\beta = (u_2^+ - \Lambda u_2^-)\dot{u}_1 + (u_2^+ - \Lambda u_2^-)[u_1]_{\frac{d}{2}}\delta(\frac{d}{2}) - (u_1^+ - \Lambda u_1^-)\dot{u}_2 + (u_1^+ - \Lambda u_1^-)[u_2]_{\frac{d}{2}}\delta(\frac{d}{2}),$$

або

$$\dot{Z}_\beta = (u_2^+ - \Lambda u_2^-)\dot{u}_1 + (u_1^+ - \Lambda u_1^-)\dot{u}_2 + \left((u_2^+ - \Lambda u_2^-)[u_1]_{\frac{d}{2}} - (u_1^+ - \Lambda u_1^-)[u_2]_{\frac{d}{2}} \right) \delta\left(\frac{d}{2}\right).$$

Тут символом $[u_{1,2}]_{\frac{d}{2}}$ позначено стрибок функції $u_{1,2}$ у точці $z = \frac{d}{2}$, тобто $[u_{1,2}]_{\frac{d}{2}} = u_{1,2}|_{\frac{d}{2}+0} - u_{1,2}|_{\frac{d}{2}-0}$ через періодичність, $[u_{1,2}]_{\frac{d}{2}} = u_{1,2}^+ - \Lambda u_{1,2}^-$. Член при дельта-функції в останньому перетворенні порушує диференційованість функції Z_β . Проте неважко бачити, що з урахуванням вибраних скалярів у лінійній комбінації (4) цей член при дельта-функції

обертається в нуль. Функції $u_{1,2}$ не є диференційованими на всій числовій осі $(-\infty, +\infty)$, однак лінійна комбінація з урахуванням виразу (4) дає диференційовану на $(-\infty, +\infty)$ функцію, причому для будь-якого значення спектрального параметра β . Далі, розмірковуючи, аналогічно запишемо другу похідну (як було щойно зазначено, перша похідна існує для будь-яких значень спектрального параметра β):

$$\left(\frac{1}{\mu}\dot{Z}_\beta\right)' = (u_2^+ - \Lambda u_2^-)\frac{1}{\mu}\dot{u}_1 - (u_1^+ - \Lambda u_1^-)\frac{1}{\mu}\dot{u}_2 + \left((u_2^+ - \Lambda u_2^-)[\dot{u}_1]_{\frac{d}{2}} - (u_1^+ - \Lambda u_1^-)[\dot{u}_2]_{\frac{d}{2}} \right) \delta\left(\frac{d}{2}\right).$$

Зрозуміло, що для тих значень спектрального параметра β , для яких член при дельта-функції обертається в нуль функції Z_β , означає диференційованість і,

як наслідок, функції Z_β є розв'язками на $(-\infty, +\infty)$. Отже, приходимо до рівняння відносно спектрального параметра β

$$(u_2^+ - \Lambda u_2^-)[\dot{u}_1]_{\frac{d}{2}} - (u_1^+ - \Lambda u_1^-)[\dot{u}_2]_{\frac{d}{2}} = 0. \quad (5)$$

Маємо рівняння відносно спектрального параметра β . Припустимо

тепер, що u_1, u_2 – нормальна система розв'язків відносно точки z_0 , тобто

$$u_1(z_0) = 1, \dot{u}_1(z_0) = 0, u_2(z_0) = 0, \dot{u}_2(z_0) = 1,$$

$$(-\Lambda u_2^-)(-\Lambda \dot{u}_1^-) - (1 - \Lambda u_1^-)(1 - \Lambda \dot{u}_2^-) = 0$$

$$\Leftrightarrow -\Lambda^2 u_2^- \dot{u}_1^- - (1 - \Lambda u_1^-)(1 - \Lambda \dot{u}_2^-) = 0$$

$$\Leftrightarrow \Lambda^2 u_2^- \dot{u}_1^- - (1 - \Lambda \dot{u}_2^- - \Lambda u_1^- + \Lambda^2 u_1^- \dot{u}_2^-) = 0.$$

Перегрупуємо доданки

$$\Lambda^2 \underbrace{(u_2^- \dot{u}_1^- - u_1^- \dot{u}_2^-)}_{=-1(\text{Вронскіан})} - 1 + \Lambda(\dot{u}_2^- + u_1^-) = 0,$$

або

$$\Lambda^2 - \Lambda(\dot{u}_2^- + u_1^-) + 1 = 0.$$

Отже, отримуємо квадратне рівняння відносно параметра Λ , як і в методі ГМ.

Нехай тепер знову, як і в методі матриць перенесення, u_1, u_2 – лінійно

незалежні (фундаментальні) розв'язки на $(-\infty, +\infty)$, визначник Вронського яких дорівнює одиниці. Утворимо з цих розв'язків таку лінійну комбінацію:

$$U_1 = \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} u_1 - \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} u_2, U_2 = -u_2|_{z_0} u_1 + u_1|_{z_0} u_2.$$

Безпосередньо підстановкою переконаємося, що ці функції U_1, U_2 є нормальною системою розв'язків відносно

точки $z_0 = \frac{d}{2}$, тобто $U_1(z_0) = 1, \frac{1}{\mu} \dot{U}_1|_{z_0} = 0, U_2(z_0) = 0, \frac{1}{\mu} \dot{U}_2|_{z_0} = 1$. Або у векторно-матричній формі при $z = z_0$

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} & -\frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} \\ -u_2|_{z_0} & u_1|_{z_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1|_{z_0} \\ u_2|_{z_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} & -\frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} \\ -u_2|_{z_0} & u_1|_{z_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

З останнього добре видно, що матриці

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} & -\frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} \\ -u_2|_{z_0} & u_1|_{z_0} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u_1|_{z_0} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} \\ u_2|_{z_0} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} \end{pmatrix}$$

є взаємно оберненими:

$$\begin{pmatrix} u_1|_{z_0} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} \\ u_2|_{z_0} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} & -\frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} \\ -u_2|_{z_0} & u_1|_{z_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

отже,

$$u_1 = u_1|_{z_0} U_1 + \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} U_2 = \alpha U_1 + \beta U_2, \tag{6}$$

$$u_2 = u_2|_{z_0} U_1 + \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} U_2 = \gamma U_1 + \delta U_2. \tag{7}$$

Покажемо еквівалентність методу матриць перенесення та підходу, що розвивається в роботі. Нехай T – матриця перенесення, тобто матриця оператора, який розв’язку $u(z)$ ставить у відповідність розв’язок $u(z-l)$: $T : u(z) \rightarrow u(z-l)$. Не порушуючи загальності, вважатимемо, що функції u_1, u_2 у двовимірному просторі розв’язків рівняння (2) мають координати

$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Для того щоб знайти елементи матриці, оператору T необхідно перейти до координатної форми. Будемо діяти оператором T на кожен фундаментальний розв’язок окремо (підкреслимо, що фундаментальні розв’язки u_1, u_2 вибираються довільно):

$$Tu_1 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{pmatrix}, \quad Tu_2 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \end{pmatrix}$$

(елементи матриці оператора T залежать від вибору системи координат). Перепишемо останні перетворення в координатній формі

$$a_{11}u_1(z) + a_{21}u_2(z) = u_1(z-l), \quad a_{12}u_1(z) + a_{22}u_2(z) = u_2(z-l).$$

Тобто маємо два рівняння, але чотири невідомих $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$, тож додаємо ще похідні:

$$a_{11} \frac{1}{\mu(z)} \dot{u}_1(z) + a_{21} \frac{1}{\mu(z)} \dot{u}_2(z) = \frac{1}{\mu(z)} \dot{u}_1(z-l),$$

$$a_{12} \frac{1}{\mu(z)} \dot{u}_1(z) + a_{22} \frac{1}{\mu(z)} \dot{u}_2(z) = \frac{1}{\mu(z)} \dot{u}_2(z-l).$$

Далі зрозуміло, що шукані елементи матриці T послідовно виписуються, розв’язуючи СЛАР у деякій точці $z = z_0$:

$$a_{11} = \frac{1}{W} \begin{vmatrix} u_1|_{z_0-l} & u_2|_{z_0} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0-l} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} \end{vmatrix}, \quad a_{21} = \frac{1}{W} \begin{vmatrix} u_1|_{z_0} & u_1|_{z_0-l} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0-l} \end{vmatrix},$$

$$a_{12} = \frac{1}{W} \begin{vmatrix} u_2|_{z_0-l} & u_2|_{z_0} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0-l} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} \end{vmatrix}, \quad a_{22} = \frac{1}{W} \begin{vmatrix} u_1|_{z_0} & u_2|_{z_0-l} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0-l} \end{vmatrix},$$

$$W = \begin{vmatrix} u_1|_{z_0} & u_2|_{z_0} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0-l} \end{vmatrix}.$$

Як видно, кожен елемент матриці перенесення являє собою певний визначник, перемножуючи відповідним

чином останні визначники, отримуємо рівняння

$$\det(T - \Lambda I) = 0$$

$$\Leftrightarrow (a_{11} - \Lambda)(a_{22} - \Lambda) - a_{12}a_{21} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} - \Lambda(a_{22} + a_{11}) + \Lambda^2 = 0$$

$$\Leftrightarrow |T| - \Lambda(a_{22} + a_{11}) + \Lambda^2 = 0.$$

Отже, отримаємо зв'язок між спектральним параметром β і власними числами Λ . Втім, маючи на меті показати еквівалентність методу матриць

перенесення та підходу, що розвивається в роботі, будемо йти дещо іншим шляхом. З урахуванням виразів (6), (7)

$$a_{11}\alpha U_1(z) + a_{11}\beta U_2(z) + a_{21}\gamma U_1(z) + a_{21}\delta U_2(z) = u_1(z - l)$$

або

$$(a_{11}\alpha + a_{21}\gamma)U_1(z) + (a_{11}\beta + a_{21}\delta)U_2(z) = u_1(z - l).$$

Оскільки система фундаментальних розв'язків U_1, U_2 спектрального рівняння $LZ = -\beta^2 Z$ є нормальною системою відносно точки z_0 , то з останнього при $z = z_0$ матимемо

$$a_{11}\alpha + a_{21}\gamma = u_1(z_0 - l).$$

Тобто маємо дві невідомі a_{11}, a_{21} , але одне рівняння. Щоб отримати друге рівняння та дві невідомі a_{11}, a_{21} , додаємо

похідну, отже, з урахуванням виразів (6), (7) записуємо

$$a_{11}\beta + a_{21}\delta = \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0-l}.$$

І наостанок,

$$\begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} u_1|_{z_0-l} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0-l} \end{pmatrix}.$$

Аналогічно переходимо до координатної форми при дії оператора T на функцію u_2 :

$$a_{12}u_1(z) + a_{22}u_2(z) = u_2(z - l)$$

$$\Leftrightarrow a_{12}\alpha U_1(z) + a_{12}\beta U_2(z) + a_{22}\gamma U_1(z) + a_{22}\delta U_2(z) = u_2(z - l)$$

$$\Leftrightarrow (a_{12}\alpha + a_{22}\gamma)U_1(z) + (a_{12}\beta + a_{22}\delta)U_2(z) = u_2(z - l),$$

при $z = z_0$

$$a_{12}\alpha + a_{22}\gamma = u_2(z_0 - l).$$

Звідки, додаючи похідну, знаходимо

$$\begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} u_2|_{z_0-l} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0-l} \end{pmatrix}.$$

Отже, матриця перенесення T подається у вигляді такого добутку:

$$T = T_1 T_2 = \begin{pmatrix} u_1|_{z_0} & u_2|_{z_0} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} u_1|_{z_0-l} & u_2|_{z_0-l} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0-l} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0-l} \end{pmatrix}.$$

Власні числа Λ_1, Λ_2 матриці T (множники Флоке) є розв'язками квадратного рівняння ($\det T_1 \neq 0$):

$$\det(T - \Lambda I) = \det(T_1 T_2 - \Lambda I) = \det(T_2 - \Lambda T_1^{-1}) \det T_1 = 0 \Leftrightarrow \det(T_2 - \Lambda T_1^{-1}) = 0$$

або

$$\left| \begin{pmatrix} u_1|_{z_0-l} & u_2|_{z_0-l} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0-l} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0-l} \end{pmatrix} - \Lambda \begin{pmatrix} u_1|_{z_0} & u_2|_{z_0} \\ \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} & \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} \end{pmatrix} \right| = 0.$$

Розкриваючи визначник, маємо

$$\begin{aligned} & (u_1|_{z_0} - \Lambda u_1|_{z_0-l}) \left(\frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0} - \Lambda \frac{1}{\mu} \dot{u}_2|_{z_0-l} \right) \\ & - (u_2|_{z_0} - \Lambda u_2|_{z_0-l}) \left(\frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0} - \Lambda \frac{1}{\mu} \dot{u}_1|_{z_0-l} \right) = 0. \end{aligned}$$

Отримане рівняння, очевидно, еквівалентне рівнянню (5), що й слід було довести.

Висновки. Стає зрозумілим, що розв'язок спектральної проблеми, яка виникає у зв'язку з розв'язанням хвильового рівняння (1) методом розділення змінних, може відшукуватися не лише методом матриць перенесення. Була показана еквівалентність методу ММП та підходу, що розвивається в роботі. При побудові

дисперсійного рівняння з'ясувалась незалежність від точки нормалізації z_0 – вираз (3). Ця відмінність дає строге математичне підґрунтя для переходу від необмеженої структури до структури з кінцевою кількістю шарів. Зазначимо, що в цьому підході суттєвим є вибір проміжку, бо тут ставка зроблена на можливість знизити диференціальні якості серед допустимих розв'язків при виході на границю.

Список використаних джерел

1. Morozov G. V., Sprung D. W. L. Floquet-Bloch waves in one-dimensional photonic crystals. EPL (Europhysics Letters). 2011. Nov. 22; 96(5): 54005. URL: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/96/54005>.
2. Казанко О. В., Пенкіна О. Є. Диференціювання поперечних розв'язків хвильового рівняння по повздовжньому хвильовому числу в дифракційній задачі для необмеженого періодичного шаруватого середовища з метаматеріалом. *Збірник наукових праць ЛОГОС*. 2020. С. 126-130.

3. Mimoli G. A transfer matrix method for calculating the transmission and reflection coefficient of labyrinthine metamaterials. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 151, 1022 (2022). doi: 10.1121/10.0009428.
4. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. Изд. 4-е. Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 512 с.
5. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики: учеб. пособ. Испр. и доп. 6-е изд. Москва: Издательство МГУ, 1999. 742 с.
6. Ахиезер Н. И., Глазман И. М. Теория линейных операторов в гильбертовых пространствах: книга для специалистов, аспирантов математических специальностей. Изд. 2-е. Москва: Наука, 1966. 544 с.
7. Виленкин Н. Я., Доброхотова М. А., Сафонов А. Н. Дифференциальные уравнения: учеб. пособ. для студ. физ.-мат. факультетов. Москва: Просвещение, 1984. 176 с.
8. Eastham M. S. P. The spectral theory of periodic differential equations. Edinburg: Scottish Academic Press, 1973. 130 pp.
9. Winkler S., Magnus W. Hill's Equation. New York, London, Sydney: Interscience Publisher a division John Wiley & Sons, 1996. 135 pp.
10. Казанко А. В., Шматько А. А., Одаренко Е. Н., Мизерник В. Н. Дисперсионные характеристики слоистых структур в задаче дифракции волн на решетке с метаматериала. *Сб. науч. трудов ХНУРЭ. Сер. Радиотехника*. 2015. С. 77-83.

Казанко Олександр Віталійович, асистент кафедри обчислювальної техніки та систем управління, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9202-8008>.

Тел.: +38 (057) 730-10-40. E-mail: kazanko@kart.edu.ua.

Пенкіна Ольга Євгеніївна, старший викладач кафедри обчислювальної техніки та систем управління,

Український державний університет залізничного транспорту. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9804-6685>.

Тел.: +38 (057) 730-10-40. E-mail: penkina@kart.edu.ua.

Kazanko Alexander, Assistant, Department of Computer Engineering and Control Systems, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9202-8008>. Tel.: +38 (057) 730-10-40.

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

Penkina Olga, Senior Lecturer, Department of Computer Engineering and Control Systems, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9804-6685>. Tel.: +38 (057) 730-10-40.

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

Статтю прийнято 27.09.2023 р.

UDC 678.023

NUMERICAL STUDY OF THE NON-ISOTHERMAL FLOW OF THE POLYMER MELT WITH UNDERMELTED GRANULES IN THE CONICAL ANNULAR CHANNEL OF A DISC EXTRUDER

Postgraduate V. Novodvorskyi, Dr. Sc. (Tech.) G. Ivanitsky, Cand. Sc. (Tech) N. Shved

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕІЗОТЕРМІЧНОЇ ТЕЧІЇ РОЗПЛАВУ ПОЛІМЕРУ З ДОПЛАВЛЕННЯМ ГРАНУЛ У КОНУСНОМУ КІЛЬЦЕВОМУ КАНАЛІ ДИСКОВОГО ЕКСТРУДЕРА

Асп. В. В. Новодворський, д-р техн. наук Г. К. Іваницький, канд. техн. наук М. П. Швед

***Abstract.** The aim of this study is to determine the regularities of the non-isothermal flow process of the melt in a conical annular channel, taking into account the heating and melting of granules due to dissipation energy. A higher rotation frequency contributes to intensive heating of the melt and a more pronounced reduction in granule volume. It has been shown that granules are melted in the conical channel. Tangential velocity components and shear velocities decrease as the cone radius diminishes, and the effective viscosity of the melt depends on temperature and shear rate. Factors affecting the pressure drop in the channel are presented. The results of the work are depicted in graphs at disk speeds of 120 and 150 rpm. The same calculation procedure is applied for the conical annular channel as for the cylindrical annular channel. The only difference is that for the cylindrical annular channel, the longitudinal coordinate z is used, whereas for the conical annular channel, the longitudinal coordinate χ is used. Thus, the introduction of orthogonal coordinates significantly simplified the overall calculation procedure for processes occurring in the homogenization zone.*

***Keywords:** disk extruder, polymers, conical annular channels, modeling, non-isothermal processes, melting.*

***Анотація.** На якість розплаву впливає багато параметрів, таких як тип обладнання, геометрія робочих органів і конфігурація каналів, у яких відбувається течія. Щоб отримати хорошу якість розплаву, потрібно підтримувати режим роботи в заданих межах, контролюючи ключові параметри, такі як температура розплаву, від якої залежать його основні характеристики. Мета цього дослідження полягає в тому, щоб визначити закономірності неізотермічного процесу течії розплаву в конусному кільцевому каналі з урахуванням нагрівання і плавлення гранул за рахунок енергії дисипації. Попередні розрахунки каналів зони гомогенізації дискового екструдера вказують на необхідність урахувати те, що частина енергії витрачається на плавлення гранул. Вища частота обертання сприяє інтенсивному нагріванню розплаву і більш інтенсивному зменшенню об'єму гранул. Показано, що гранули доплавляються в конусному каналі, після чого все тепло іде на нагрівання розплаву. Тангенціальні складові швидкості і швидкості зсуву зменшуються зі зменшенням радіуса конуса, а ефективна в'язкість розплаву залежить від температури та швидкості зсуву. Перепад тиску в каналі визначається рядом факторів, серед яких ширина каналу, коефіцієнт консистентності та показник степеня. Надано графічні залежності розподілу температури розплаву, питомого об'єму гранул, тиску, усереднених тангенціальних швидкостей зсуву та зміни ефективної в'язкості розплаву по довжині*

каналу при швидкостях диска 120 і 150 об/хв. Для конусного кільцевого каналу застосовується така сама процедура розрахунку, як і для циліндричного кільцевого каналу. Різниця лише в тому, що для циліндричного кільцевого каналу застосовується подовжня координата z , а для конусного кільцевого каналу застосовується подовжня координата χ . Тому введення ортогональних координат істотно спростило загальну процедуру розрахунків процесів, які відбуваються в зоні гомогенізації.

Ключові слова: дисковий екструдер, полімери, конусні кільцеві канали, моделювання, неізотермічні процеси, плавлення.

Introduction. The melt quality depends on many factors [1, 2]. A significant factor is the type of equipment and the specifics of the working parts' geometry. A well-chosen screw clearance can lead to improved mixing quality [3]. To achieve high melt quality, it is essential to ensure a stable extrusion process. Therefore, it is crucial to understand the flow nature and the primary extrusion process parameters that significantly influence the process itself. Such parameters include, for example, the melt temperature, which varies throughout the homogenization zone and on which the thermophysical and rheological characteristics depend.

Literature review and problem statement. Preliminary calculations have shown that if all granules are fully melted at the entrance to the homogenization zone, the melt temperature rises sharply and significantly deviates from actual readings. This suggests the need to consider energy consumption for the additional melting of granules in the melt. This is confirmed in study [4], where samples obtained after stopping the melting were analyzed. It can be inferred that the solid polymer, in a fully filled area, is displaced by the melt to the upper part of the clearance, and melting occurs due to energy dissipation in the melt films. Experiments have shown that the most stable operating modes are those in which 50–60 % of the melt forms in the screw thread [4]. The homogenization zone of the disc extruder consists of 4 channels (Fig. 1), which includes two straight annular channels, a conical annular channel, and a disc clearance. The straight annular has been discussed in works [5, 6], and in work [7], a computational

experiment of the melt flow model with undermelted granules was conducted, describing the calculation methodology. It also demonstrates that the granules continue to melt in the conical channel. In work [8], the flow processes in the conical channel and the calculation procedure in analytical form are described for the first time. This article addresses the flow processes in the conical channel with undermelted granules.

The aim and objectives of the study.

The objective of the study is to investigate the non-isothermal flow process of the melt in the conical annular channel, which contains solid particles, to describe the heating and melting process of granules due to dissipation energy. In line with this objective, the following tasks have been set:

- Determine the regularities of the non-isothermal flow process of the melt in the conical annular channel;
- Identify the change in pressure, average melt temperature, average volumetric temperature of the granules, effective viscosity of the melt, and volumetric fraction of granules along the channel length;
- Analyze how the melt temperature in the channel changes, considering the melting of the granules and the disc rotation rate.

The main part of the study. Let a stationary flow of polymer melt occur through a narrow conical annular clearance of width h_K and length L_2 , due to a pressure drop ΔP_2 , in the χ direction with a constant specified volumetric flow rate (Fig. 2). The generatrix of the cone is at an angle α to the axial line of symmetry O-O₃. The flow of the fluid is considered in the orthogonal

coordinate system (χ, κ, θ) , which is related to the cylindrical coordinates by the following relations: the axial coordinates of both systems are related by the relationship $\chi = z/\cos \alpha$, and the radial coordinates κ and r are related by the relationship $\kappa = r/\cos \alpha$ [8]. As can be seen in Fig. 2, at a certain distance χ from the

beginning of the channel, the radius $R\chi_1$ is the length of the segment AB, and the length of the segment AC is the radius $R\chi_2$. The radii $R\chi_1$ and $R\chi_2$ along the channel length are related by the following relationship:

$$R\chi_2(\chi) = R\chi_1(\chi) + h_{\kappa}. \quad (1)$$

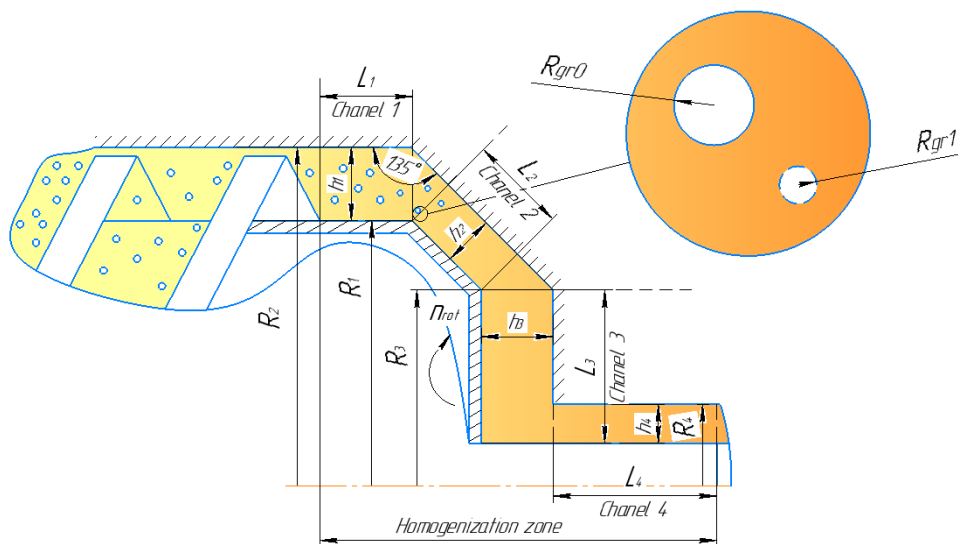


Fig. 1. Schematic image of the homogenization zones of the disk extruder

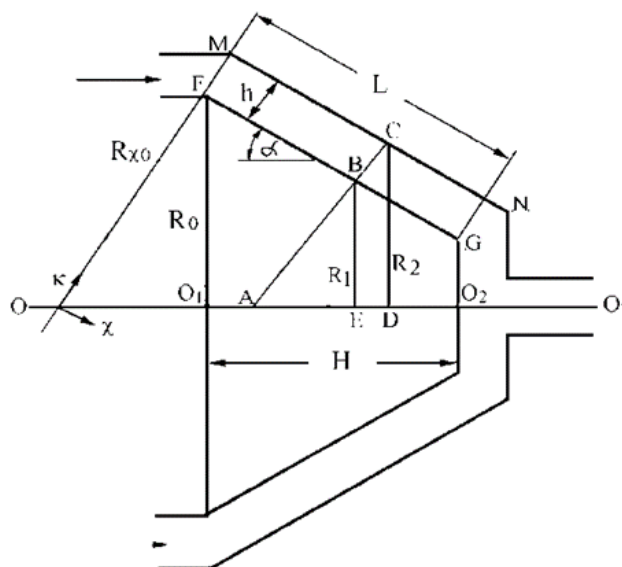


Fig. 2. Schematic representation of the conical annular clearance.
Connection between cylindrical and orthogonal coordinates

Along the coordinate χ radii $R\chi_1$ and $R\chi_2$ in the orthogonal coordinate system depend on R_1 in cylindrical coordinates as follows:

$$R\chi_1 = R_1/\cos \alpha \text{ and } R\chi_2 = R_1/\cos \alpha + h_\kappa. \quad (2)$$

The dependencies of these radii on the coordinate χ are defined by the equations:

$$R\chi_1(\chi) = R\chi_0 - \chi \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad (3a)$$

$$R\chi_2(\chi) = R\chi_0 - \chi \cdot \operatorname{tg} \alpha + h. \quad (3b)$$

The radial coordinate ψ has been introduced [5, 8]. It determines the distance of a specified point inside the clearance from the surface of the moving cone and is related to the radial cylindrical coordinate r by the relation:

$$\psi = (r - R_1)/\cos \alpha. \quad (4)$$

The cross-sectional area $S_h(\chi)$ at distance χ is defined as:

$$S_h(\chi) = 2\pi h_\kappa \cdot (R\chi_0 - \chi \operatorname{tg} \alpha + h_\kappa/2) \cdot \cos \alpha. \quad (5)$$

The difference from modeling the flow of the non-isothermal process in the first zone lies in the fact that the cross-sectional area $S_h = f(\chi)$ and the average velocity $\bar{v}_\chi = f(\chi)$ vary along the length of the conical channel. Therefore, the width-averaged longitudinal velocity is defined as:

$$\bar{v}_\chi = \frac{G_V}{S_h(\chi)} = \frac{G_V}{2\pi h_\kappa \cdot (R\chi_0 - \chi \operatorname{tg} \alpha + h_\kappa/2) \cdot \cos \alpha}. \quad (6)$$

In this problem $\alpha = 45^\circ$ so subsequent equations take into account that $\operatorname{tg} \alpha = 1$.

The polymer melt, representing a non-Newtonian pseudo-plastic fluid, contains a certain number of monodisperse unfused polymer granules with an initial radius R_{gr0} (Fig. 1). These granules are uniformly distributed throughout the melt volume. The number of granules per unit volume of the mixture remains constant $n_{gr} = \text{const}$. Hence, the initial volumetric fraction of the polymer granules is defined as $V_{gr0} = 4/3 \pi R_{gr0}^3 \cdot n_{gr}$ and is measured in

m^3/m^3 . The temperature at which the polymer fully transits from solid to liquid state is known and equals T_m . The melt temperature at the channel inlet equals T_{l0} . The initial average volumetric temperature of all granules is uniform and equals $\bar{T}_{gr0} < T_m < T_{l0}$. It is assumed that at temperatures $T \leq \bar{T}_{gr0}$, the polymer is in solid state, while at temperatures $T \geq T_m$, it's in liquid state. Within the temperature range $\bar{T}_{gr0} \div T_m$ the polymer melts, transiting from solid to liquid state. Specified are the density value ρ_l , thermal

conductivity λ_l , and specific heat of the melt c_l , which are considered constant at temperatures $T \geq T_m$. Also defined are the density ρ_s and thermal conductivity of the solid phase λ_s , which remain constant within the temperature range $T_{gr} \div T_m$. In the polymer melting temperature range $T_{gr} \div \bar{T}_m$, the heat capacity initially increases from $c_s(T_{gr0})$ value, and then, after reaching its maximum, decreases to c_l . For an approximate determination of the enthalpy change during polymer melting, an average value \bar{c}_s is used. This value was identified based on studies of data from tables and literature concerning thermal and rheological characteristics of LDPE. It is assumed that, within the studied temperature range, the density of the solid phase of the granules is ρ_s , to an accuracy of 5%, equal to the density of the polymer melt ρ_l . When the inner cone rotates in viscous fluid, frictional forces arise between adjacent cylindrical melt layers. This friction results in the conversion of mechanical energy into heat, causing the melt to heat up due to viscous energy dissipation. Without loss of generality, we'll assume that the temperature of the channel wall's surface at each clearance section χ equals the current melt temperature $T_l(\chi)$, meaning the process occurs in an adiabatic mode. During the melting process of granules,

their volumetric fraction V_{gr} decreases, and correspondingly, the volumetric fraction of the melt $(1 - V_{gr})$ increases.

It is necessary to determine the pressure change $p_\chi = f(\chi)$, the average melt temperature $\bar{T}_l = f(\chi)$, the effective melt viscosity $\mu_{ef} = f(\chi)$, the average volumetric granule temperature $\bar{T}_{gr} = f(\chi)$, and the volumetric fraction of granules $V_{gr} = f(\chi)$ along the channel length. The problem is solved in orthogonal coordinates (χ, ψ, θ) [8].

Modeling heat exchange processes in the channel of II zone. Let's assume that the polymer melt, along with a certain amount of unfused granules, enters the conical annular channel of the second zone from the exit of the straight annular channel of the first homogenization zone. We will apply the same assumptions as for the first zone. All granules are monodisperse and have a spherical shape, which they retain until their final melting. The volume of one granule is $V_{gr1} = 4/3 \cdot \pi R_{gr}^3$, where $R_{gr} = f(\tau)$ is the current granule radius, which changes along the channel (Fig. 1). The number of granules per unit volume of melt n_{gr} remains constant throughout the melting process.

Then, the heat energy inflow with the liquid mixture through the conical annular surface with coordinate χ i.e. the enthalpy value at the channel entrance is:

$$H_\chi = \rho_l c_l \bar{v}_\chi (T_l - T_{st})_\chi (1 - V_{gr})_\chi (S_h)_\chi + \rho_s c_s \bar{v}_\chi (\bar{T}_{gr} - T_{st})_\chi n_{gr} V_{gr1} \Big|_\chi (S_h)_\chi. \quad (7)$$

The heat energy (enthalpy) outflow with the liquid mixture through the flat annular surface with coordinate $\chi + \Delta\chi$:

$$H_{\chi+\Delta\chi} = \rho_l c_l \bar{v}_{\chi+\Delta\chi} (T - T_{st})_{\chi+\Delta\chi} (1 - V_{gr})_{\chi+\Delta\chi} (S_h)_{\chi+\Delta\chi} + (S_h)_{\chi+\Delta\chi} + \rho_s c_s \bar{v}_{\chi+\Delta\chi} (\bar{T}_{gr} - T_s)_{\chi+\Delta\chi} n_{gr} V_{gr1} \Big|_{\chi+\Delta\chi}. \quad (8)$$

Subtracting the first equation (7) from the second (8), we get:

$$\Delta H = \rho_l c_l \cdot \bar{v}_\chi(\chi) S_h(\chi) \cdot \left[\Delta T - \Delta(T \cdot V_{gr}) + \frac{\rho_s c_s}{\rho_l c_l} \Delta(\bar{T}_{gr} \cdot V_{gr}) \right]. \quad (9)$$

It is considered that in any channel section, the product $\bar{v}_\chi(S)_\chi = G_V = \text{const}$ remains constant. Since there are no external heat sources, the enthalpy remains unchanged, so:

$$\Delta H = \rho_l \cdot c_l \cdot \bar{v}(\chi) \cdot S_h(\chi) \cdot \left[\Delta T - \Delta(T \cdot V_{gr}) + \frac{\rho_s c_s}{\rho_l c_l} \Delta(\bar{T}_{gr} \cdot V_{gr}) \right] = 0. \quad (10)$$

We rewrite equation (10), expanding the terms in the round brackets.

$$\Delta H = \rho_l \cdot c_l \cdot \bar{v}_\chi(\chi) \cdot S_h(\chi) \cdot \left[\Delta T - n_{gr} \cdot \Delta T \cdot V_{gr1} - n_{gr} \cdot T \cdot \Delta V_{gr1} + \frac{\rho_s c_s}{\rho_l c_l} \Delta \bar{T}_{gr} \cdot V_{gr} + \frac{\rho_s c_s}{\rho_l c_l} \bar{T}_{gr} \cdot \Delta V_{gr} \right] = 0. \quad (11)$$

The volume change of the granule $\Delta V_{gr1} = 0$ occurs because a portion of the granule volume melts and transitions from a solid state to a liquid one i.e. a phase transition takes place. This requires a quantity of heat (enthalpy) equal to $Q_{melt} = n_{gr} \Delta V_{gr1} \cdot \bar{c}_s (T_m - \bar{T}_{gr})$. This is the latent heat of polymer melting, defined as the increase in temperature of the polymer's solid phase. The heat of melting, i.e., the increase in enthalpy of the solid phase, is spent from the enthalpy of the melt itself. Moreover, at each step, a portion of the melt's enthalpy is spent on heating the melted portion of the

polymer from the temperature T_m to the current melt temperature $T(\chi)$. This part of the melt's enthalpy change equals $Q_{нагр} = n_{gr} \Delta V_{gr1} \cdot \bar{c}_s (T(\chi) - T_m)$. As a result, the enthalpy change ($Q_{melt} + Q_{нагр}$) is compensated by the change in melt's enthalpy so that the overall enthalpy of the «melt-granule» system remains unchanged ($\Delta H = 0$), provided there are no external heat sources.

Considering the latent heat of melting, the right side of the heat balance equation (11) is written as:

$$\bar{v}(\chi) S(\chi) \cdot \left\{ \rho_l c_l (1 - V_{gr}) \cdot \Delta T - \left[\rho_l c_l \cdot (T_l - T_m) + \rho_s \bar{c}_s (T_m - \bar{T}_{gr}) \right] \cdot \Delta V_{gr} + \rho_s c_s \cdot \Delta \bar{T}_{gr} \cdot V_{gr1} \right\} = 0. \quad (12)$$

In view of viscous dissipation in the heat balance equation, it's necessary to account for the fact that the liquid melt occupies only a portion of the volume, equal to $(1 - V_{gr})$. Thus, the dissipation power, which indicates

the amount of heat transferred to the layer $d\chi$ with volume $S_h d\chi$ in a unit of time, is described by the equation:

$$\Delta H_{dis} = \mu_{ef}(T) \cdot \left(\bar{\gamma}_{\psi\chi}^2 + \bar{\gamma}_{\psi\theta}^2 \right) \cdot (1 - V_{gr}) \cdot S_h \Delta\chi, \quad (13)$$

or its equivalent equation:

$$\Delta H_{dis} = K_T \cdot \left[\left(\bar{\dot{\gamma}}_{\psi\chi}^2 + \bar{\dot{\gamma}}_{\psi\theta}^2 \right) \right]^{\frac{1+n}{2}} \cdot (1 - V_{gr}) \cdot S_h \Delta\chi. \quad (14)$$

Where $\mu_{ef}(T)$ is the effective viscosity of the melt, described for pseudoplastic fluids by the Oswald-de Waele power-law; $\bar{\dot{\gamma}}_{\psi\chi} = d\bar{v}_\chi/d\psi$ is the average shear rate of the longitudinal flow across the clearance width; $\bar{\dot{\gamma}}_{\psi\theta} = d\bar{v}_\theta/d\psi$ is the average shear rate of the tangential flow across the clearance width; $K_T = f(T)$ is the consistency coefficient; $n = f(T)$ is the flow index.

As in previous works [5, 8], the shear rate of longitudinal flow $\dot{\gamma}_{\psi\chi}$ is negligibly smaller than the shear rate of tangential flow $\dot{\gamma}_{\psi\theta}$ and can be disregarded, which is applied in subsequent calculations. The average shear rate of the tangential flow in the conical annular channel $\bar{\dot{\gamma}}_{\psi\theta}$ is determined from the equation:

$$\bar{\dot{\gamma}}_{\psi\theta}(\chi) = -\frac{2\omega_0}{\left[\left(\frac{(R_{\chi 1} + h_K/2)}{R_{\chi 1} - h_K/2} \right)^2 - \left(\frac{(R_{\chi 1} + h_K/2)}{R_{\chi 1} + 3h_K/2} \right)^2 \right]}. \quad (15)$$

Equation (15), considering equation (3a), describes the change in the average shear rate along the channel length.

The amount of enthalpy entering the layer $\Delta\chi$ due to viscous dissipation can be represented through effective viscosity by the equation:

$$\Delta H_{dis} = \mu_{ef}(T) \cdot \bar{\dot{\gamma}}_{\psi\theta}^2 \cdot (1 - V_{gr}) \cdot S_h \Delta\chi \quad (16)$$

or apply the consistency coefficient in the form of an equivalent equation:

$$\Delta H_{dis} = K_T \cdot \bar{\dot{\gamma}}_{\psi\theta}^{1+n} \cdot (1 - V_{gr}) \cdot S_h \Delta\chi. \quad (17)$$

Thus, the enthalpy difference of the mixture $\Delta H_{\Delta\chi}$ at any section of the channel is only due to the heat of viscous dissipation and equals the dissipation power q_{dis} on that

section. Taking into account equations (12) and (17), we will write the heat balance equation in layer $\Delta\chi$ in the presence of thermal dissipation:

$$\bar{v}(\chi) \cdot S(\chi) \cdot \left\{ \rho_l c_l \cdot (1 - V_{gr}) \cdot \Delta T - \left[\rho_l c_l \cdot (T_l - T_m) + \rho_s \bar{c}_s \cdot (T_m - \bar{T}_{gr}) \right] \cdot \Delta V_{gr} + \rho_s c_s \cdot \Delta \bar{T}_{gr} \cdot V_{gr1} \right\} = K_T \cdot \bar{\dot{\gamma}}_{\psi\theta}^{1+n} \cdot (1 - V_{gr}) \cdot S_h \Delta\chi. \quad (18)$$

Dividing both parts of equation (12) by $S(\chi)\Delta\chi$ and transitioning to the limit $\Delta\chi \rightarrow 0$:

$$\bar{v}(\chi) \left\{ \rho_l c_l (1 - n_{gr} V_{gr1}) \frac{dT}{d\chi} - [\rho_l c_l (T_l - T_m) + \rho_s \bar{c}_s (T_m - \bar{T}_{gr})] n_{gr} \frac{dV_{gr1}}{d\chi} + \rho_s c_s \frac{d\bar{T}_{gr}}{d\chi} n_{gr} V_{gr1} \right\} = K_T \dot{\gamma}_{\psi\theta}^{1+n} (1 - V_{gr}). \quad (19)$$

It follows that the temperature change of the melt along the length of the channel of the second zone can be represented in the form of the equation:

$$\frac{dT}{d\chi} = \frac{1}{(1 - V_{gr})} \left\{ \frac{K_T \dot{\gamma}_{\psi\theta}^{1+n} \cdot (1 - V_{gr})}{\rho_l c_l \cdot \bar{v}(\chi)} + \left[(T_l - T_m) + \frac{\rho_s \bar{c}_s}{\rho_l c_l} (T_m - \bar{T}_{gr}) \right] \frac{dV_{gr}}{d\chi} - \frac{\rho_s \bar{c}_s}{\rho_l c_l} \frac{d\bar{T}_{gr}}{d\chi} \cdot V_{gr} \right\}. \quad (20)$$

The rate of volume change of granules $dV_{gr}/d\chi$ during their melting is a negative value, so the second term in curly brackets is also negative. Equation (19) contains three unknown variables that depend on the coordinate χ . These are the melt temperature T , the granule volume V_{gr} , and the average volume temperature of the granule \bar{T}_{gr} . To determine the latter two parameters, two additional equations are required that describe the relationships $V_{gr} = f(\chi)$ and $\bar{T}_{gr} = f(\chi)$.

Calculation of the granule melting rate. A polymer mixture at temperature $T_l(\chi)$ passes through a channel and, from the melt to granules with surface temperature T_m , heat is transferred. Due to this heat, the surface layer of the granules melts and they heat up. This means their average temperature increases \bar{T}_{gr} . The melting rate of a single granule can be denoted as $dm_{gr1}/d\tau = \rho_{gr} dV_{gr1}/d\tau$. Then, for a set of monodisperse granules, the melting rate can be determined from the heat exchange equation. The heat exchange equation for granules with the melt can be represented as follows:

$$4\pi R_{gr1} \lambda_l (T_l - T_m) \cdot n_{gr} = 4\pi R_{gr1}^2 \frac{dR_{gr1}}{d\chi} n_{gr} \rho_l \bar{c}_s (T_m - \bar{T}_{gr}) \cdot \bar{v}_\chi + 4\pi R_{gr1} \lambda_s (T_m - \bar{T}_{gr}) \cdot n_{gr}. \quad (21)$$

The left side of this equation is the amount of heat transferred from the melt to the granules through heat conduction. The first term on the right side of (21) represents the amount of introduced heat used to melt the granule's surface layer. The second term on the

right side represents the amount of introduced heat used for heating the granules. The heat exchange equation is expressed in terms of the total volume of the granule aggregate, rather than the radius of the granule, using the following relationships:

$$4\pi R_{gr1} = \left(\frac{3V_{gr}}{4\pi n_{gr}}\right)^{0,33} = 7,8 \cdot \left(\frac{V_{gr}}{n_{gr}}\right)^{0,33} \quad \text{and} \quad 4\pi R_{gr1}^2 \frac{dR_{gr1}}{d\chi} n_{gr} = \frac{dV_{gr}}{d\chi}. \quad (22)$$

Thus, the heat exchange equation is reduced to:

$$\rho_l \cdot c_s (T_m - \bar{T}_{gr}) \bar{v}_\chi \frac{dV_{gr}}{d\chi} = 7,8 \cdot \left(\frac{V_{gr}}{n_{gr}}\right)^{0,33} n_{gr} [\lambda_l (T_l - T_m) - \lambda_s (T_m - \bar{T}_{gr})]. \quad (23)$$

Solving this equation in terms of $dV_{gr}/d\chi$, we get a differential equation for the granule melting rate in the melt flow per unit length of the channel.

$$\frac{dV_{gr}}{d\chi} = - \frac{7,8 \cdot (V_{gr}/n_{gr})^{0,33} \cdot n_{gr}}{\rho_l \cdot c_s (T_m - \bar{T}_{gr}) \cdot \bar{v}_\chi} \cdot [\lambda_l (T_l - \bar{T}_m) - \lambda_s (T_m - \bar{T}_{gr})]. \quad (24)$$

The obtained differential equation describes the dependency $V_{gr} = f(\chi)$.

Calculation of the change in the average volume temperature of the granule. As seen from equation (20), out of all the heat

transferred from the melt to the granules over a section of the channel $d\chi$, a portion of the heat is used to increase their average volume temperature \bar{T}_{gr} :

$$4\pi R_{gr1} (T_m - \bar{T}_{gr}) \cdot n_{gr} = \rho_l \bar{c}_s \bar{v}_\chi \left(\frac{4}{3} \pi R_{gr1}^3\right) \frac{d\bar{T}_{gr}}{d\chi} n_{gr}. \quad (25)$$

By simplifying both parts of equation (25), we get:

$$\frac{d\bar{T}_{gr}}{d\chi} = \frac{3\lambda_s \cdot (T_m - \bar{T}_{gr})}{\rho_l \bar{c}_s \cdot \bar{v}_\chi \cdot R_{gr1}^2}. \quad (26)$$

Substituting relationship (22) into (26), we bring the equation to the form:

$$\frac{d\bar{T}_{gr}}{d\chi} = \frac{3\lambda_s \cdot (T_m - \bar{T}_{gr})}{0,384 \cdot (V_{gr}/n_{gr})^{0,66} \cdot \rho_l \cdot \bar{c}_s \cdot \bar{v}_\chi}. \quad (27)$$

As a result, a differential equation for the relationship $\bar{T}_{gr} = f(\chi)$ is obtained.

The system of equations for the heating and melting processes in II zone includes differential equations and algebraic equations.

1. The melt temperature equation, expressed through the consistency coefficient:

$$\frac{dT}{d\chi} = \frac{1}{(1-V_{gr}) \cdot c_l} \left\{ \frac{K_T \cdot (\bar{\gamma}_{\nu\theta})^{1+n} (1-V_{gr})}{\rho_l \cdot \nu_z} + [c_l(T-T_m) + c_s(T_m-T_{gr})] \frac{dV_{gr}}{d\chi} - c_s V_{gr} \frac{dT_{gr}}{d\chi} \right\}. \quad (28)$$

Boundary condition: $T_l(0) = T_0$.

2. Equation for the change in granule volume in the mixture:

$$\frac{dV_{gr}}{d\chi} = - \frac{7,8 \cdot (V_{gr}/n_{gr})^{0,33} n_{gr}}{\rho_l \cdot c_s (T_m - \bar{T}_{gr}) \cdot \bar{v}_\chi} \cdot [\lambda_l(T_l - \bar{T}_m) - \lambda_s(T_m - \bar{T}_{gr})]. \quad (29)$$

Boundary condition: $V_{gr}(0) = V_{gr0}$.

3. Equation for the average temperature of the granule:

$$\frac{dT_{gr}}{d\chi} = \frac{3\lambda_s \cdot (T_m - T_{gr})}{0,384 \cdot (V_{gr}/n_{gr})^{0,66} \rho_l c_s \nu_\chi}. \quad (30)$$

Boundary condition: $T_{gr}(0) = T_{gr0}$.

4. Equation for the pressure gradient in the channel:

$$\frac{dp}{d\chi} = \frac{A_2}{(2R\chi_0 + h_\kappa - 2\chi)^n}, \quad (31)$$

where

$$A_2 = - \frac{K_T \cdot (G_V)^n}{(h_\kappa/2)^{2n+1}} \cdot \left(\frac{2n+1}{2\pi \cdot n \cdot \cos \alpha} \right)^n.$$

Equation (31) is solved with the boundary condition: $p(0) = p_0$.

In addition to differential equations, the model also includes algebraic equations describing:

1. The change in the cross-sectional area along the length of the channel:

$$S_h(\chi) = 2\pi h_\kappa \cdot (R\chi_0 - \chi \operatorname{tg} \alpha + h_\kappa/2) \cdot \cos \alpha. \quad (32)$$

2. The change in average longitudinal velocity along the length of the channel:

$$\bar{v}_\chi = G_V / S_h(\chi). \quad (33)$$

3. The change in the average clearance width shear velocity of tangential movement along the channel length χ :

$$\bar{\gamma}_{\psi\theta}(\chi) = - \frac{2\omega_0}{\left[\left(\frac{R\chi_0 - \chi + h_K/2}{R\chi_0 - \chi - h_K/2} \right)^2 - \left(\frac{R\chi_0 - \chi + h_K/2}{R\chi_0 - \chi + 3h_K/2} \right)^2 \right]} \quad (34)$$

4. The dependence of the consistency coefficient K_T on temperature:

$$K_T(T) = K_{st} \cdot \exp[-\beta \cdot (T_l - T_{st})], \quad (35)$$

where $K_{st} = K_T(T_{st})$; β is viscosity temperature coefficient.

5. The dependence of the exponent on temperature:

$$n = n_{st} + \alpha_n(T_l - T_{st}), \quad (36)$$

where $n_{st} = n(T_{st})$, α_n are temperature coefficients.

6. Dependence of effective viscosity on temperature:

$$\mu_{ef}(T) = K_T(T) \cdot (\bar{\gamma}_{\psi\theta})^{n-1}. \quad (37)$$

The obtained differential equations for the conical annular channel are analogous in form to the corresponding equations of the straight cylindrical annular channel. The difference lies in that instead of the longitudinal coordinate z , the longitudinal coordinate χ is considered in the second channel. The introduction of orthogonal coordinates significantly simplifies the calculation procedure for processes in this homogenization zone. Moreover, the equation system for the conical annular channel is supplemented by three algebraic equations (equations (33), (34) and (35)) that account for changes in the channel cross-sectional area and disc radius, as well as the associated change in shear velocities of longitudinal and tangential movement.

Analysis of Research Results. A flow model of the melt with unfused granules in the conical annular channel has been created and a computational experiment was conducted. The length of the straight annular clearance $L_2 = 40$ mm, width $h_K = 2,5$ mm. The experiment was performed at two rotational speeds of the screw $\omega_0 = 120$ rpm and

150 rpm. High-pressure polyethylene of grade 15803-020 was chosen as the model object.

The melt with granules moves through the conical annular channel at a constant volumetric flow rate of $G_V = 9,06 \cdot 10^{-6}$ m³/s with an average speed $\bar{v}_\chi(\chi)$ that increases in length due to a reduction in the cross-sectional area. Changes in the cross-sectional area $S_h = f(\chi)$ and the cone radius along the channel length significantly influence the changes in temperature, pressure, viscosity, tangential, and longitudinal speed and the corresponding shear rates. As shown above, since the shear rate of longitudinal flow can be neglected when calculating the intensity of dissipation, the degree of dissipative heating of the melt depends solely on the shear rate $\bar{\gamma}_{\psi\theta}$ and thus decreases in length.

According to equations (28) and (29), the rate of temperature change of the melt and the melting rate of the granules along the channel length should depend on the rotation frequency of the inner cone. As can be seen in (Fig. 3, a, b), the higher the rotation frequency of the inner cone, the more the melt temperature increases.

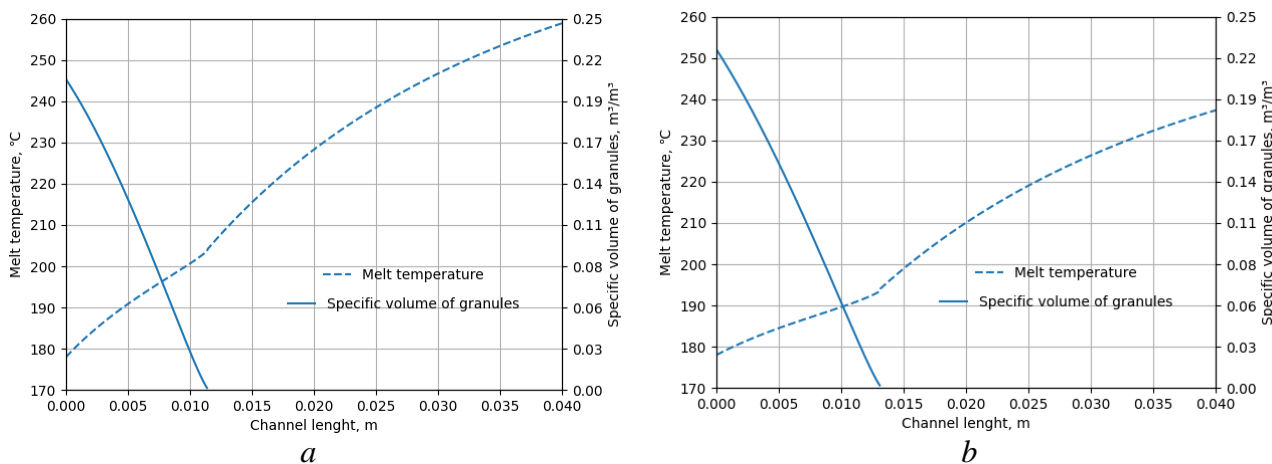


Fig. 3. Distribution of the melt temperature T and the specific volume of granules V_{gr} along the length of the II zone at different rotation frequencies: $a - \omega_0 = 150$ rpm; $b - \omega_0 = 120$ rpm

The figures show that as the temperature increases more intensively, the melting process of the granules becomes more intense and their total volume decreases faster. Also, in (Fig. 3, a, b), it can be observed that the granules completely melt inside the conical annular channel and the subsequent heat of dissipation is exclusively used for heating the melt.

According to the increase in melt temperature along the length of the channel, the effective viscosity of the melt decreases, as illustrated by the data presented in (Fig. 4, a, b).

As can be seen from the figures, the change in the screw's rotation number significantly affects the change in the melt's viscosity. Fig. 4, a, b also show that due to the decrease in the cone's radius with the channel length, the average tangential shear speed $\bar{\gamma}_{\psi\theta}(\chi)$, determined by equation (34), decreases almost linearly along the length. Unlike in the straight annular channel, in the conical annular channel, the tangential shear speed in each channel cross-section χ increases proportionally to the rotation frequency ω_0 .

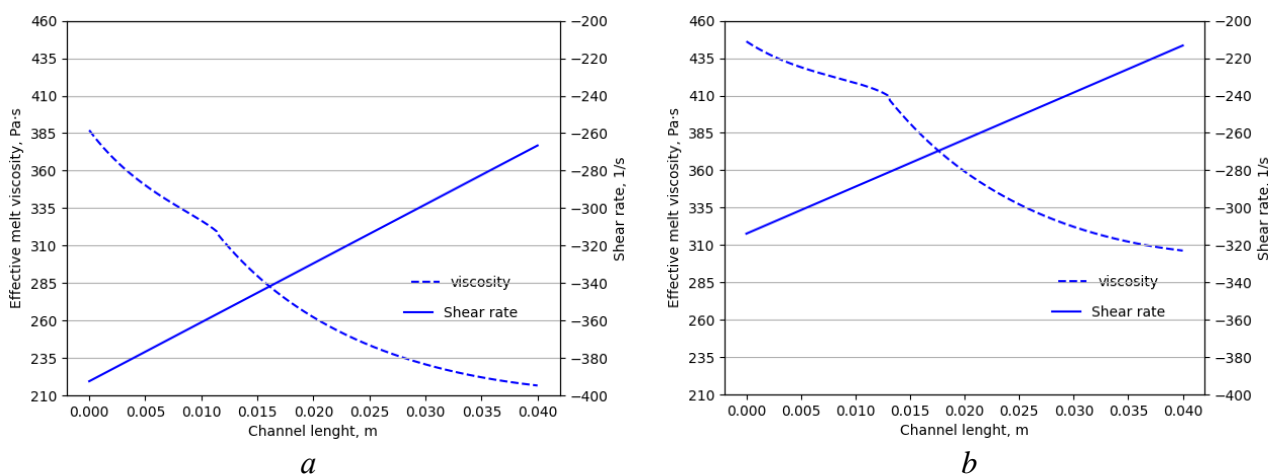


Fig. 4. Distribution of the effective melt viscosity and the shear rate of the tangential flow along the length of the II zone at different rotation frequencies: $a - \omega_0 = 150$ rpm; $b - \omega_0 = 120$ rpm

As shown in (Fig. 5, a, b), the pressure drop in the channel $\Delta p(L_2)$ is approximately up to 8 atm and, as can be seen from equation (31), depends on the channel's width, the

consistency coefficient $K_T = f(\chi)$, and the degree index $n = f(\chi)$, which depend on the melt temperature. The latter, in turn, depends on the rotation frequency of the disk.

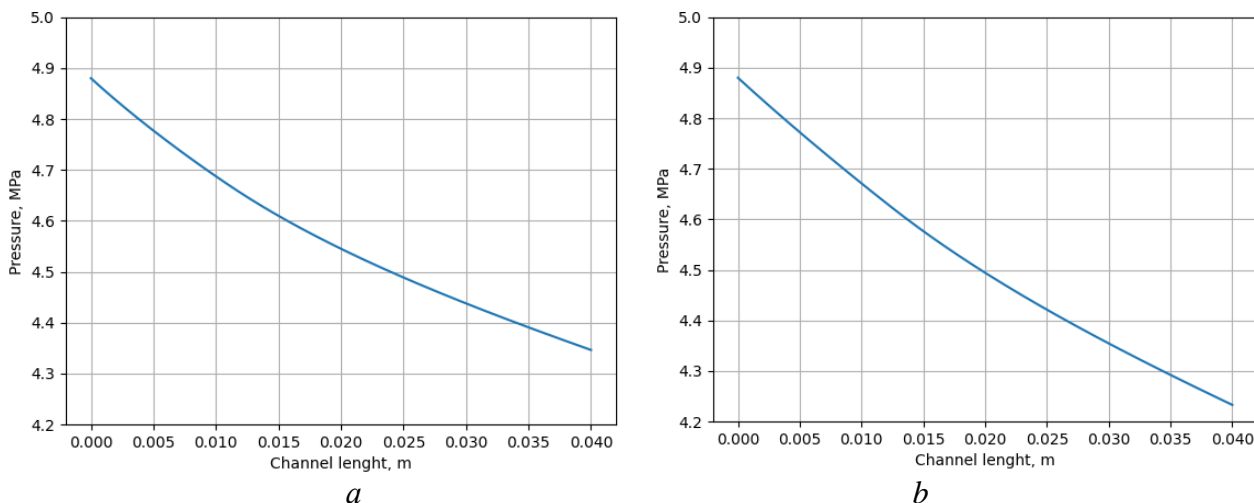


Рис. 5. Distribution of the pressure along the length of the channel of II zone at different rotation frequencies:

a – $\omega_0 = 150$ rpm; *b* – $\omega_0 = 120$ rpm

Conclusions. Modeling of heat exchange processes in a conical channel was conducted. The heating and melting processes of granules at disk rotation frequencies of 120 and 150 rpm have been described and calculated. Calculations indicate that the granules are melted in the second channel. It is

shown that with an increase in the rotation of the inner cone, the melt temperature rises, and the volume of granules in the mixture decreases faster. The process calculations were carried out in a conical orthogonal coordinate system.

Reference

1. Campbell G. A., Spalding M. A. Analyzing and troubleshooting single-screw extruders. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2020.
2. Rauwendaal C. (2014). Polymer extrusion. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
3. Xin Y., Zhu X., & Wang T. (2020, March). Mixing Characteristics of Polymer Melt in Triple Screw Extruders with Combined Screws using Finite Element Method. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 768, No. 2. P. 022068. IOP Publishing.
4. Mikulionok I. O., Radchenko L. B. (2015). Modeliuvannia dyskovykh ekstruderiv dlia pereroblennia polimernykh materialiv. Kyiv: NTUU «KPI».
5. Novodvorskyi V., Ivanitsky G. (2023). Modeling of polymer melt flow in the annular channel of a disk extruder, [Modelyuvannia techyi rozplavu polimeru v kil'tsevomu kanali dyskovoho ekstrudera], Science and transport progress, No. 1(101), 37–46. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2023/282982> (in Ukrainian).

6. Novodvorskyi V., Shved M. (2022). The process of melt homogenization in a metered-discharge disk extruder, [Proces gomoghenizaciji rozplavu v dyskovomu ekstruderi z dozovanyim zhyvlenniam], Science and transport progress. (3-4 (99-100)), 48–54, doi: <https://doi.org/10.15802/stp2022/275702> (in Ukrainian).

7. Novodvorskyi V., Ivanitsky G., Shved N. (2023). Numerical study of nonisothermal flow of polymer melt with undermelted granules in an annular channel of a disk extruder, Scientific journal of the Ternopil National Technical University.

8. Novodvorskyi V., Ivanitsky G., Shved N. (2023). Modeling of the non-isothermal flow of the polymer melt in the conical annular channel of the disk extruder, [Modeljuvannja neizotermichnoji techiji rozplavu polimeru v konusnomu kiljcevomu kanali dyskovogho ekstrudera], Science and transport progress, № 2(102). URL: <https://doi.org/10.15802/stp2023/287370> (in Ukrainian).

Новодворський Володимир Валерійович, аспірант кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. Тел.: +38 096 040 4659.

E-mail: novodvorskiyvolodymyr@gmail.com. ORCID 0000-0002-2895-4506.

Іваницький Георгій Костянтинович, доктор технічних наук, професор кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. Тел.: +38 067 145 6135.

E-mail: gergey4@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>.

Швед Микола Петрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна. Тел.: +38 (066) 740 2545. 03056. ORCID 0000-0001-7725-1447. E-mail: npchved46@gmail.com.

Novodvorskyi Volodymyr, postgraduate student of the Department of Machines and Devices for Chemical and Oil Refining Industry, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Peremohy prospekt, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. Tel.: +38 096 040 4659. E-mail: novodvorskiyvolodymyr@gmail.com. ORCID 0000-0002-2895-4506.

Ivanitsky Georgiy, doctor of Engineering Sciences, professor of the Department of Machines and Devices for Chemical and Oil Refining Industry, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Peremohy prospekt, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. Tel.: +38 067 145 6135. E-mail gergey4@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>.

Shved Nikolai, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machines and Devices for Chemical and Oil Refining Industry, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Peremohy prospekt, 37, Kyiv, Ukraine, 03056. Tel.: +38 (066) 740 2545. E-mail npchved46@gmail.com. ORCID 0000-0001-7725-1447.

Статтю прийнято 28.09.2023 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.07

ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ КЛЕЙОВОГО ШАРУ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН З'ЄДНАННЯ ПРИ КЛЕЙОВОМУ АНКЕРУВАННІ СТАЛЕВИХ СТРИЖНІВ У БЕТОН

Кандидати техн. наук С. М. Золотов, О. М. Пустовойтова, д-р техн. наук Л. В. Трикоз, канд. техн. наук С. М. Камчатна, асп. С. А. Савісько

IMPACT OF THE GLUE LAYER PROPERTIES ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE GLUE ANCHOR FOR THE STEEL ROD IN CONCRETE

PhD (Tech.) S. Zolotov, PhD (Tech.) O. Pustovoitova, Dr. Sc. (Tech.) L. Trykoz, PhD (Tech.) S. Kamchatna, postgrad. student S. Savisko

Анотація. У статті розглянуті питання розподілення напружень і переміщень вздовж сталевго анкера, закріпленого в бетоні полімерним зв'язуючим – акриловим компаундом. Встановлено, що максимальні значення дотичних, радіальних і колових напружень, що більш повно характеризують роботу з'єднання, змінюються залежно від міцнісних характеристик клейового шару та його товщини за експоненціальним законом. Отримані результати напружень у будь-якій точці клейового з'єднання дають змогу запропонувати методологію проектування сталевих стрижнів у бетоні, закріплених полімерами.

Ключові слова: анкерне з'єднання, акриловий полімер, напружено-деформований стан, модуль пружності.

Abstract. The article deals with the distribution of stresses and displacements along a steel anchor fixed in concrete with a polymer binder - an acrylic compound. It was established that the maximum values of tangential, radial, and circular stresses, which more fully characterize the operation of the connection, change depending on the strength characteristics of the adhesive layer and its thickness according to the exponential law. The obtained results of stress at any point of the adhesive joint allow us to propose a methodology for the design of steel rods in concrete fixed with polymers. As a result of solving the problem of the stressed-strained state of the anchor connection on acrylic adhesives, equations were obtained for determining stresses and strains at any point.

As a result of the analysis of the obtained dependencies, the following conclusions can be drawn. When calculating the strength of anchor joins on acrylic adhesives, it is necessary to take into account the maximum values of tangential, radial, and circular stresses. In order to calculate the strength of the join, it is necessary to know the strength limit at uniform separation of the glue from the metal surface, as well as at shear for the glue-metal contact. Tangential and normal stresses in the adhesive cylinder and at the adhesive-concrete interface decrease with an increase in the modulus of elasticity of the acrylic adhesive. But this leads to an increase in normal axial stresses in the part of the anchor embedded in concrete and radial stresses at the glue-anchor and glue-concrete contacts. The elasticity modulus of the glue layer is smaller than the elasticity modulus of concrete and metal. Therefore, the adhesive distributes the stresses that arise from the

application of the pull-out force between the anchor and the concrete massif. This is explained by the fact that the pull-out stresses from the anchor are completely transferred to the adhesive layer and then to the concrete. The main vector of tangential stresses does not depend on the ratios of the elasticity modulus of the materials which form the anchor join. The thickness of the adhesive layer has a slight effect on the stress in the glue-anchor contact, but significantly on the stress in the glue-concrete contact.

Keywords: anchor join, acrylic polymer, stress-strain state, elasticity modulus.

Вступ. Великі обсяги відновлювальних робіт передбачають підвищені вимоги не тільки щодо міцності використаних матеріалів, але й швидкості виконання з'єднань частин конструкцій. Суттєве значення має використання сучасних методів кріплення елементів до бетонних або залізобетонних конструкцій, що зазвичай виконується за допомогою анкерів. Акрилові клейові композиції є одним із тих матеріалів, що дає змогу найбільш швидко і якісно з мінімальними затратами з'єднувати бетонні та залізобетонні елементи. До переваг клейового анкерування арматурних стрижнів при ремонті, реконструкції та підсиленні конструкцій можна віднести зниження термінів виконання робіт, можливість встановлення анкерів за різних погодних умов, здатність підсиленних конструкцій сприймати проектне навантаження через 6 ÷ 24 год, екологічну безпеку акрилових клеїв для навколишнього середовища.

Полімери і бетони за своєю природою мають анізотропні властивості, тому їхній розрахунок потребує точніших моделей і розрахункових рівнянь, а також застосування досконаліших математичних методів. Особливість створення сучасних конструкцій із композитних матеріалів полягає у проектуванні властивостей цих матеріалів, для чого слід розробляти нові теорії та методи розрахунку, що дали б змогу оцінювати напружено-деформований стан конструкції заданої геометричної форми та неоднорідної структури. Широке застосування композитних матеріалів як несучих елементів конструкцій багатьох сучасних споруд потребує надійних методів

їхнього розрахунку. В Україні відсутні нормативні документи, що регламентують норми проектування таких з'єднань. Існуючі стандарти надають розрахункові рівняння для розрахунку міцності на висмикування анкерів у бетоні під навантаженням розтягування. Однак ці емпіричні рівняння ґрунтуються на експериментах, що не враховують закономірності руйнування полімерного шару. Отже, дослідження напружено-деформованого стану таких з'єднань дасть змогу краще зрозуміти механізм деформації вклеєного анкера, оцінити вплив різних факторів на їхню ефективність і запропонувати методологію проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У попередньому дослідженні [1] авторами встановлено, що через відсутність нормативної методики з проведення випробувань базальтопластикових анкерних з'єднань ускладнюється оцінювання їхньої несучої здатності при дії поздовжніх і поперечних зусиль. Показано, що використані методики дають змогу з достатньою мірою вірогідності визначити зону пружної роботи анкера при відриві, але, чи розповсюджуються ці висновки на полімерні матеріали, залишилося нез'ясованим. У той же час деякі автори доводять доцільність застосування акрилових клеїв для з'єднання бетонних і залізобетонних елементів, анкерування сталевих стрижнів у бетон при будівництві та реконструкції будівель і споруд різного призначення. На підставі експериментів, виконаних авторами роботи [2], показано переваги використання хімічних анкерів на акрилових композиціях для кріплення технологічного

устаткування. Акрилові клеї за своїми механічними властивостями не поступаються з'єднанням на епоксидних клеях, а за технологічними – перевершують їх. Тому їх також застосовують для приклеювання сталевих пластин до поверхні бетону модифікованими акриловими клеями [3]. Міцність такого безанкерного кріплення залежить від класу бетону, товщини клейового шва та інших конструктивних характеристик кріплення вузла.

Однак переважна більшість методик розрахування залізобетонних елементів і конструкцій, у тому числі і за чинними нормативними документами [4, 5], взаємодію арматури з бетоном ураховують лише опосередковано або ж повністю ігнорують. У роботі [6] розроблено загальну модель зчеплення арматури з бетоном, в основу якої покладено функцію універсального параметра – зусилля зчеплення арматурного стрижня з бетоном уздовж поверхні їхнього контакту. Ці зусилля автор визначає за допомогою середніх напружень зчеплення арматури з бетоном, функція яких є нелінійною відносно нормальних напружень в арматурі. Недоліком такого підходу є неврахування інших напружень, які виникають у бетоні і зоні зчеплення анкера з бетоном, що важливо для прогнозування довготривалої міцності анкерних з'єднань. Для розуміння тертя ковзання в контактах метал-полімер у роботі [7] подана модель для контактної зони однієї нерівності, яка ковзає в канавці після повторних циклів, що дає змогу визначити напругу зсуву пари сталь-полімер у відповідній геометрії. В експериментах із 1000 повторюваних циклів було виявлено, що площа контакту змінюється залежно від навантаження та швидкості ковзання, тоді як напруга зсуву становила 20,5 МПа при нормальному тиску 50÷70 МПа незалежно від швидкості, коли нагрівання тертям все ще незначне.

Порівняння результатів теоретичного аналізу та аналізу методом кінцевих елементів, виконаних у роботі [8], показує,

що точність теорії може бути використана для розроблення попереднього проєкту анкерів для з'єднання стрижнів з вуглепластику. У цій статті подано теоретичну модель розподілу напруги пружного зсуву на інтерфейсі армованого вуглецевим волокном полімеру і адгезиву однострижневого та багатострижневого анкера для з'єднання. Механічні характеристики анкера для з'єднання з кількома стрижнями внутрішнього конуса оцінюються в межах різних коефіцієнтів тертя і внутрішніх кутів нахилу. Чисельні результати вказують на те, що прямопараболічний з'єднувальний анкер із внутрішнім конусом має значний вплив на зменшення сили зсуву на кінці навантаження. Напруження в полімері вивчалось і в роботі [9], у якій автори навели рекомендації щодо проєктування анкерів з армованого вуглецевим волокном полімеру на основі бази даних 51 дрібно-масштабного випробування. Показано, що анкери з вуглепластику мають бути розроблені так, щоб витримувати повну здатність до розтягування смуг композиту. При цьому розподіл ширини тріщини в елементі може спричинити деформації, що перевищують максимально допустиму ефективну деформацію. Щоб досягти повного використання полімеркомпозитного матеріалу, співвідношення матеріалу анкера до смуги вуглепластику має бути більше 2,0.

Автори роботи [10] досліджували вплив радіальних напружень, спричинених анкерним компонентом в анкерній зоні, на властивості розтягування армованих базальтовим волокном полімерних тяжів і визначили допустимі радіальні напруги для проєктування та застосування. Експерименти на розтягування були проведені для визначення міцності на розрив армованих базальтовим волокном полімерних тяжів з різними типами кріплення, включаючи склеювання, тертя і стиснення з захисним шаром для досягнення різних рівнів радіальних

напружень. Поздовжня міцність на стиск, поперечна міцність на стиск і міцність на зсув у площині самих армованих базальтовим волокном полімерних тяжів були також виміряні для теоретичного прогнозування. Результати показали, що середні значення граничної міцності армованих базальтовим волокном полімерних тяжів, закріплених тертям і стисненням з різними радіальними напруженнями, на 5, 12 і 15 % нижчі, ніж у зразків, скріплених анкером. Авторами рекомендовано граничні значення радіального напруження в анкерній зоні 50 МПа, щоб гарантувати відсутність зниження міцності, і 130 МПа, щоб уникнути руйнування при стисненні. Ці дані можуть бути покладені в основу розроблення ефективного анкерного кріплення для застосування попереднього напруження армованого базальтовим волокном полімерного тяжа.

Для клейових анкерних систем загальна характеристика усадки матеріалу дуже важлива для остаточного зчеплення між клеєм і стінкою отвору. Реакція затвердіння термореактивних смол пов'язана з хімічною усадкою, що накладається на теплове розширення в результаті екзотермічної ентальпії. Остаточні властивості матеріалу полімеру визначаються цим критичним процесом. У роботі [11] подано підхід до вимірювання на місці тривимірної усадки і теплового розширення для двох анкерних систем на полімерній основі (епоксидна смола з наповнювачем і вінілефір). Вінілефірна система показала вищу усадку, але набагато більш швидко реакцію порівняно з досліджуваною епоксидною смолою. Як показано в роботі [12], для зниження усадкових деформацій найбільш придатним наповнювачем є кварцовий пісок крупністю 0,14 мм у кількості 150 масових частин маси акрилового полімеру. Усадкові деформації у п'ять разів менше, ніж у ненаповненій композиції, і на 10 % менше, ніж при наповненні портландцементом.

Однак відсутність нормативних документів для проєктування анкерних клейових з'єднань і недостатність даних про поведінку саме акрилових полімерів для анкерування робить дослідження напруженого стану з'єднання при клейовому анкеруванні сталевих стрижнів у бетон актуальною темою.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою вирішення завдання про напружено-деформований стан анкерного з'єднання на акрилових зв'язуючих є визначення напружень і деформацій в будь-якій точці. Для досягнення мети поставлено окремі завдання дослідження: обґрунтувати метод розрахування клейового анкерного з'єднання на основі розв'язання осесиметричної задачі теорії пружності для багат шарових ізотропних циліндричних тіл; проаналізувати вплив модуля пружності клею і товщини акрилового шару на напруження і переміщення у клеї й бетоні відповідно в контактних зонах між полімером і сталевим анкером, а також між полімером і бетоном; встановити якісні і кількісні закономірності розподілу компонент їхніх напружено-деформованих станів.

Основна частина дослідження

Обґрунтування методу розрахування акрилового анкерного з'єднання. Для такої задачі анкерного з'єднання характерними є деформації, симетричні відносно деякої осі. Осесиметричний розподіл деформацій і напружень виникає в тілах обертання, навантажених осесиметричним способом, а саме в циліндрах круглого перерізу. У таких задачах зручніше застосовувати циліндричну систему координат (r, φ, z) . Через осесиметричний розподіл деформацій і напружень переміщення, деформації і напруження не будуть залежати від кута φ .

При заданому рівні експлуатаційного навантаження бетон, сталевий анкер і акриловий полімер можна вважати пружними тілами, що відповідають закону Гука. Тому напружено-деформований стан

анкерного з'єднання опишемо залежностями теорії пружності для деформації ізотропного напівпростору, на границі якого діє розподілене по коловій області навантаження, що задовольняє умови осьової симетрії. Для випадку осесиметричної деформації тіла, що складається з трьох циліндрів – сталевий анкер, акриловий клей, бетон навколо – система рівнянь теорії пружності зводиться до рівняння рівноваги в переміщеннях (рівняння Ляме)

$$\nabla^2 \nabla^2 F(r, z) = 0, \quad (1)$$

де $F(r, z)$ – функція напружень Лява.

Оператор ∇^2 дорівнює

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (2)$$

Компоненти тензора радіальних σ_r , колових σ_θ , нормальних осьових σ_z , дотичних τ_{rz} напружень і вектора переміщень $u(r, z)$, $w(r, z)$ через функцію $F(r, z)$ можна виразити такими формулами:

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(\vartheta \nabla^2 F - \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} \right), \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial z} \left(\vartheta \nabla^2 F - \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} \right), \quad (4)$$

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left((2 - \mu) \nabla^2 F - \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left((1 - \mu) \nabla^2 F - \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

$$u = - \frac{1 + \mu}{E} \frac{\partial^2 F}{\partial r \partial z}, \quad (7)$$

$$w = \frac{1}{2G_1} \left(2(1 - \mu) \nabla^2 F - \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

де $G_1 = E/2(1 + \nu)$ - модуль зсуву;

E – модуль пружності;

μ – коефіцієнт Пуассона.

Розв'язок цієї осесиметричної задачі теорії пружності при граничних умовах, що відповідають висмикуванню анкера з двошарового середовища, було отримано в роботі [13] як вирази дотичних τ_{rz} , нормальних осьових σ_z , радіальних σ_r і колових σ_θ напружень, осьових W і радіальних u переміщень. На підставі розрахунків за формулами (4)-(16), отриманих у роботі [13], встановлено характер розподілу напружень і переміщень, що виникають у контактній зоні між полімером і сталевим анкером, а також контактній зоні між полімером і бетоном у забитій частині анкера при впливі зусилля при висмикуванні $P_{\text{висм}} = \frac{\pi d_s^2}{4} \sigma_{z_0}^s$, де d_s – діаметр анкера, $\sigma_{z_0}^s$ – напруження на завантаженому кінці анкера, МПа.

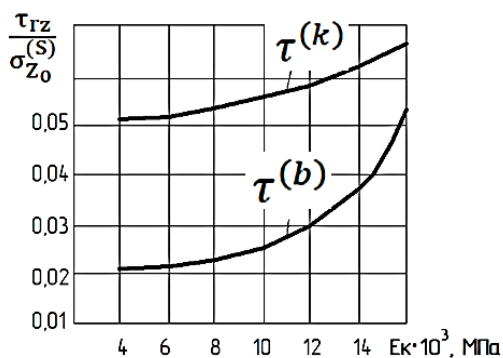
Вплив фізико-механічних властивостей і товщини полімерного шару на напружений стан анкерного з'єднання встановлювали шляхом розрахункового багатофакторного експерименту. При цьому значення модуля пружності полімерного шару приймалися згідно з попередніми дослідженнями авторів впливу кількості наповнювача акрилового компаунду на його модуль пружності.

Розрахунок для модуля пружності полімерного компаунду. Розрахунки виконані для величин модуля пружності акрилового полімеру з наповнювачем $3,8 \cdot 10^3$; $5,1 \cdot 10^3$; $6,1 \cdot 10^3$; $7,3 \cdot 10^3$; $9,5 \cdot 10^3$; $13,3 \cdot 10^3$ МПа. Для порівняння отриманих залежностей з результатами інших дослідників решту вихідних даних було прийнято за роботою [13]: діаметр сталевий анкера $d_s = 2$ см, глибина закладення анкера $l_{\text{анк}} = 20$ см, модуль пружності $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu_s = 0,25$, товщина полімерного шару 1 см, модуль пружності бетону класу C12/15 $E_b = 2,3 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu_b = 0,16$.

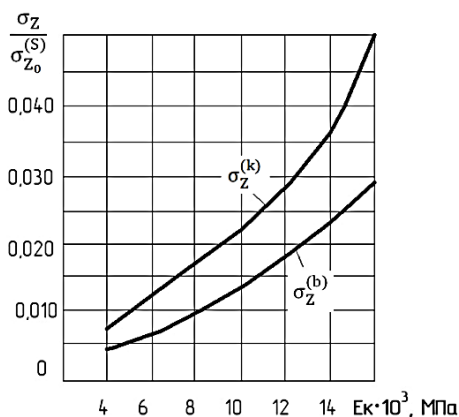
За результатами розрахунків побудовано графіки залежностей максимумів нормальних осьових напружень у сталевій частині анкера σ_z^s , бетони σ_z^b і полімері σ_z^k , дотичних τ_{rz} , радіальних $\sigma_r^{k(b)}$ і колових $\sigma_\theta^{k(b)}$ напружень відповідно в контактній зоні між наповненим полімером

і сталевим анкером і контактній зоні між наповненим полімером і бетоном, а також переміщень у полімері й бетони W і u на тих самих контактних зонах (рис. 1). Для наочного порівняння величин зусиль отримані результати надано у відносних величинах τ_{rz}/σ_z^s , $\sigma_r^{k(b)}/\sigma_z^s$, $\sigma_\theta^{k(b)}/\sigma_z^s$.

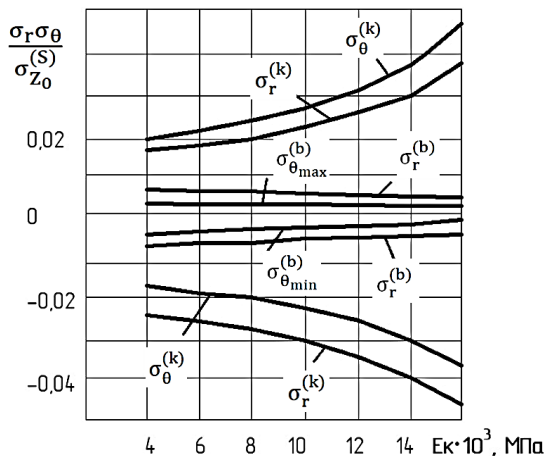
а



б



в



г

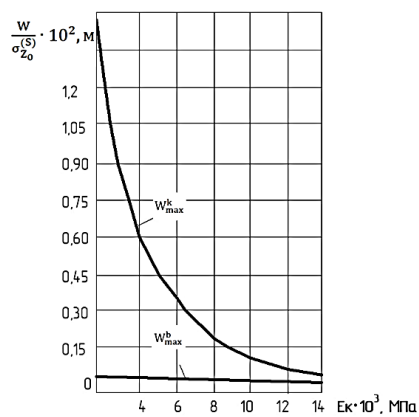
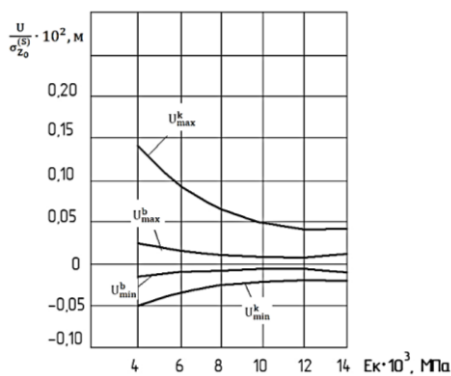


Рис. 1. Залежність максимумів напружень і переміщень від модуля пружності акрилового компаунду в контактній зоні між наповненим полімером і сталевим анкером (к) і контактній зоні між наповненим полімером і бетоном (б): а – дотичні напруження; б – нормальні осьові напруження; в – нормальні колові напруження; г – радіальні переміщення; д – осьові переміщення

Як свідчать дані рис. 1, збільшення модуля пружності акрилових компаундів в анкерних з'єднаннях призводить до підвищення міцності клейового анкерування (рис. 1, а-в) і зменшення переміщень з'єднання (рис. 1, г, д). При збільшенні модуля пружності акрилової композиції з наповненням зменшуються дотичні й нормальні напруження в полімерному циліндрі і контактній зоні між полімером і бетоном. Збільшення нормальних осьових напружень у частині анкера, розташованій у бетоні, і радіальних напружень на поверхнях розділу полімер-сталь і полімер-бетон свідчить про загальне збільшення жорсткості анкерного з'єднання за допомогою наповнених акрилових композицій.

На відміну від суцільного циліндра, колові напруження в тришаровому циліндрі значно перевищують радіальні і досягають свого максимуму в зовнішньому шарі бетону на поверхні контакту, де приблизно в чотири рази більші за радіальні. У внутрішньому полімерному шарі колові і радіальні напруження значно менші, ніж у бетонному шарі. Збільшення модуля пружності E_k акрилової композиції з наповнювачем перерозподіляє напруження, що виникають між сталевим анкером і бетонною обоймою. Це пояснює значне зменшення відносних величин осьових W і радіальних u переміщень при дії сили, що висмикує анкер із з'єднання при навантаженні.

Розрахунок для товщини клейового шару. Для тих самих вихідних даних побудовано графіки залежностей максимумів вказаних напружень і переміщень від товщини полімерного шару (рис. 2).

Як свідчать дані рис. 2, зміна товщини полімерного клею значно змінює напружено-деформований стан анкерного з'єднання. При зменшенні товщини клейового шару напруження в з'єднанні в контактній зоні полімер-сталь збільшуються відносно мало, а в контактній

зоні полімер-бетон значно зростають. Переважно це призводить до збільшення дотичних $\tau_{rz}^{(b)}$ і радіальних $\sigma_r^{(b)}$ напружень у бетоні, що зі зменшенням товщини полімерного шару досягають значень дотичних і радіальних напружень у полімері на границі розділу полімер-сталь. У зв'язку з недостатньою міцністю бетону на зріз і розтяг таке збільшення дотичних і нормальних радіальних напружень у бетоні на контакті полімер-бетон найбільш небезпечне.

Висновки. У результаті розв'язання тривимірної задачі теорії пружності для суцільного циліндра скінченної довжини під дією заданого на бічній поверхні та торцях силового навантаження були отримані рівняння для визначення напружень і деформацій анкерного з'єднання на акрилових клеях у будь-якій точці.

Максимальні значення дотичних, радіальних і колових напружень, що характеризують роботу анкерних з'єднань на акрилових клеях, змінюються як при зміні модуля пружності, так і з товщиною клейового шару. Дотичні й нормальні напруження в полімерному циліндрі і контактній зоні на поверхні розділу полімер-бетон зменшуються зі збільшенням модуля пружності акрилового клею. Але це призводить до збільшення нормальних осьових напружень у частині анкера, розташованій у бетоні, і радіальних у контактних зонах на поверхнях розділу полімер-сталь і полімер-бетон. Товщина клейового шару впливає незначно на напруження в контактній зоні полімер-метал, але значною мірою на напруження в контактній зоні полімер-бетон. Встановлено, що осьові напруження розтягу спадають при віддаленні від бічної поверхні полімеру, а радіальні і колові напруження мають значення набагато менші від осьових. У зоні закінчення дії дотичних навантажень на бічній поверхні спостерігаємо максимуми осьових напружень, що зростають із зменшенням

товщини полімерного шару і швидко спадають при віддаленні від бічної поверхні. Указані залежності границь міцності при рівномірному відриві

полімеру від поверхні металу, а також при зсуві на контактній зоні полімер-сталь будуть покладені в основу для розроблення методів розрахування подібних з'єднань.

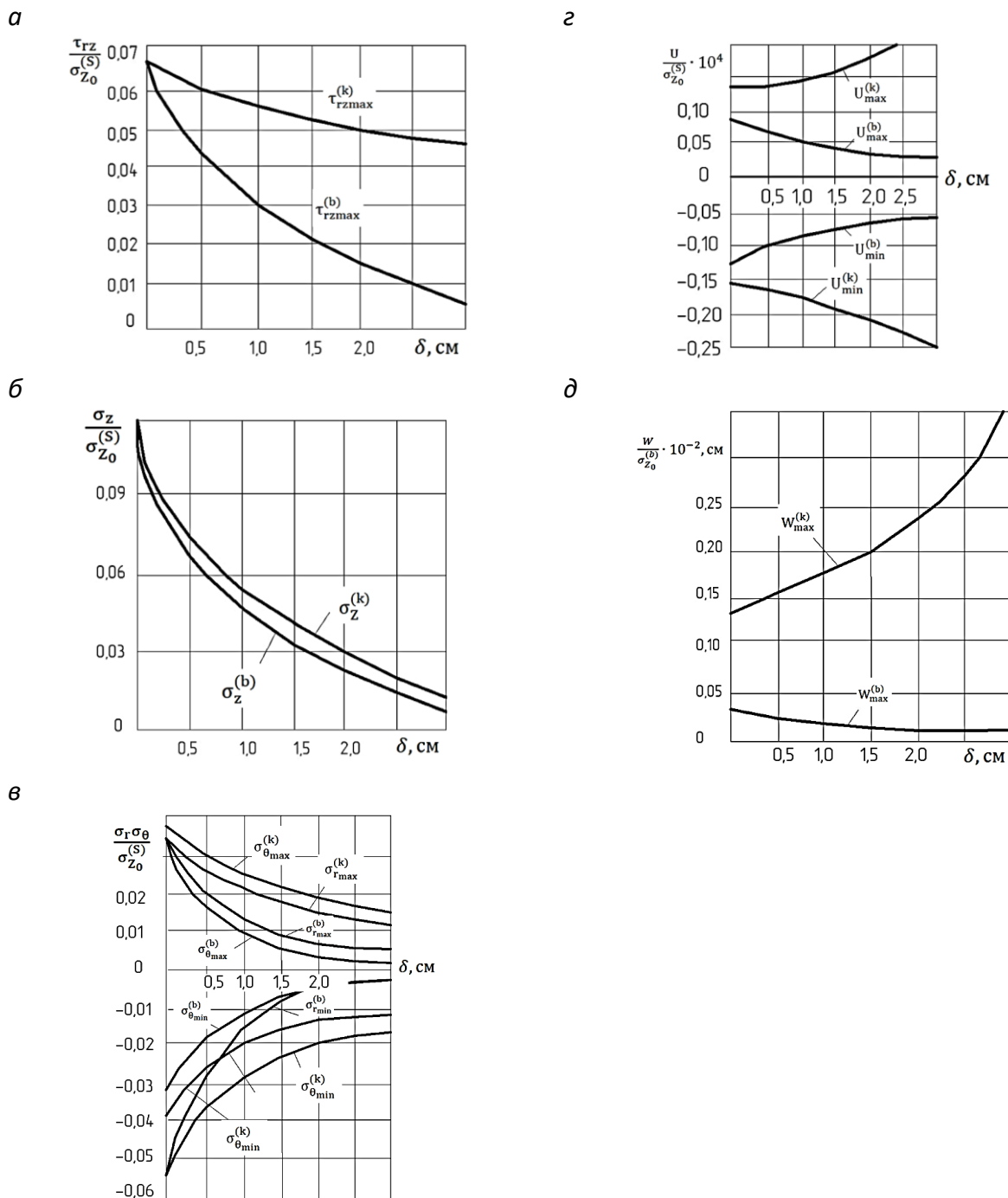


Рис. 2. Залежність максимумів напружень і переміщень від товщини клейового шару акрилового полімеру δ в контактній зоні між наповненим полімером і сталевим анкером (k) і контактній зоні між наповненим полімером і бетоном (b): a – дотичні напруження; б – нормальні осьові напруження; в – нормальні колові напруження; г – радіальні переміщення; д – осьові переміщення

Список використаних джерел

1. Міцність і деформативність сталевих та базальтопластикових анкерних з'єднань / С. В. Золотов, О. М. Пустовойтова, Г. М. Литвинова та ін. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. Серія: Технічні науки та архітектура. Харків: ХНУМГ, 2017. Вип. 137. С. 104-108.
2. Переваги використання хімічних анкерів на акрилових композиціях для кріплення технологічного устаткування / Н. М. Золотова, В. О. Склярів, О. Ю. Супрун, Д. М. Вихров. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 183. С. 87-95. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.183.2019.169785>.
3. Фирсов П. М. Экспериментальные исследования кратковременной прочности сталеклеевого безанкерного соединения на акриловых модифицированных композициях. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 167. С. 4-17.
4. ДСТУ Б В.2.6-7-95 (ГОСТ 8829-94). Конструкції будинків і споруд. Вироби будівельні бетонні та залізобетонні збірні. Методи випробувань навантаженням. Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості. Чинний від 01.04.96. Київ: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. 22 с.
5. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Чинний від 01.06.11. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.
6. Ромашко-Майструк О. В. Моделирование зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 190. С. 35-41. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.213925>.
7. Pei X.-Q., Lin L., Schlarb A.K., Bennewitz R. Contact Area and Shear Stress in Repeated Single-Asperity Sliding of Steel on Polymer. *Tribology Letters*. 2019. Vol. 67. Is. 1. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11249-019-1146-y>.
8. Feng P., Zhang P., Meng X., Ye L. Mechanical Analysis of Stress Distribution in a Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rod Bonding Anchor. *Polymers*. 2014. Vol. 6. Is. 4. P. 1129–1143. URL: <https://doi.org/10.3390/polym6041129>.
9. Shekarchi W. A., Pudleiner D. K., Alotaibi N. K., Ghannoum W. M., Jirsa J. O. Carbon Fiber-Reinforced Polymer Spike Anchor Design Recommendations. *Structural Journal*. 2020. Vol. 117. Is. 6. P. 171-182. URL: <https://doi.org/10.14359/51728065>.
10. Shi J., Wang X., Wu Z., Zhu Z. Effects of radial stress at anchor zone on tensile properties of basalt fiber-reinforced polymer tendons. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015. Vol. 34. Is. 23. P. 1937–1949. URL: <http://dx.doi.org/10.1177/0731684415606857>.
11. Singer G., Sinn G., Lichtenegger H.C., Veigel S., Zecchini M., Wan-Wendner R. Evaluation of in-situ shrinkage and expansion properties of polymer composite materials for adhesive anchor systems by a novel approach based on digital image correlation. *Polymer Testing*. 2019. Vol. 79. P. 106035. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106035>.
12. Трикоз Л. В., Камчатна С. М., Пустовойтова О. М. Вплив виду та кількості наповнювача на деформативні властивості акрилового композиційного матеріалу для ремонту бетонних конструкцій. *Вісник ОДАБА. Зб. наук. праць*. 2019. Вип. 74. С. 122-128. URL: <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2019-74-122-128>.

13. Анкерні болти: конструкція, розрахунок, проектування, технологія, влаштування: навч. посіб. / Л. М. Шутенко, М. С. Золотов, В. О. Склярів, Н. М. Золотова; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. Харків: ХНАМГ, 2010. 204 с.

Золотов Сергій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10.

E-mail: bk@kname.edu.ua. ORCID 0000-0002-3649-1871.

Пустовойтова Оксана Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10.

E-mail: oksana_pustov@ukr.net. ORCID 0000-0003-4078-4834.

Трикоз Людмила Вікторівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68.

E-mail: lvtrikoz@ukr.net. ORCID 0000-0002-8531-7546.

Камчатна Світлана Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики та фізики, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-70.

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

Савісько Сергій Анатолійович, аспірант, кафедра будівельних конструкцій, Навчально-науковий інститут будівельної та цивільної інженерії, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Zolotov Sergii, PhD, Associate Professor, Building Construction Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy. Tel.: (057) 707-31-10. E-mail: bk@kname.edu.ua.

Pustovoitova Oksana, PhD, Associate Professor, Building Construction Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy. Tel.: (057) 707-31-10. E-mail: oksana_pustov@ukr.net.

Trykoz Liudmyla, DSc, professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net.

Kamchatna Svitlana, PhD, associate professor, Department of Higher Mathematics and Physics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-70. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com.

Savisko Serhii, postgraduated student, Building Construction Department, Academic and Research Institute of Civil Engineering and Utility Systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy. Tel.: (057) 707-31-10.

E-mail: bk@kname.edu.ua.

Статтю прийнято 18.08.2023 р.

УДК 624.012.35:620.173/174

ОСНОВНІ ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ ЗА ДІЇ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Канд. техн. наук О. В. Ромашко-Майструк, д-р техн. наук В. М. Ромашко

MAIN FEATURES OF CONCRETE DEFORMATION UNDER THE ACTION OF DYNAMIC LOADS

PhD(Tech.) O. V. Romashko-Maistruk, Dr. Sc.(Tech.) V. M. Romashko

Анотація. Стаття присвячена особливостям загальної моделі деформування стиснутого бетону в бетонних і залізобетонних елементах і конструкціях за дії динамічних навантажень. Основна увага приділена загальновідомому коефіцієнту динамічного зміцнення бетону (DIF). Класифіковано та проаналізовано основні переваги і недоліки існуючих на сьогодні методів і способів його визначення. Аналітично отримано обґрунтовану залежність коефіцієнта DIF від швидкості деформування стиснутого бетону. Ефективність запропонованої методики визначення коефіцієнта DIF оцінено

порівнянням результатів відповідних теоретичних розрахунків з оприлюдненими експериментальними даними окремих дослідників.

Ключові слова: модель деформування, бетон, швидкість деформування, питома потенціальна енергія, коефіцієнт динамічного зміцнення.

Abstract. This article is devoted to the features of the general model of compressed concrete deformation in concrete and reinforced concrete elements and structures under the dynamic loads action. The proposed model is a further in-depth development of the previously developed generalized deformation and force model of concrete and reinforced concrete resistance to force effects. It is based on the hypothesis of invariability and independence from the loading mode of the specific potential energy of concrete ultimate deformation (destruction) in a standard sample. A critical analysis of the research results by other authors published today on the above-mentioned subject has been performed.

The main attention is paid to the well-known dynamic increase factor (DIF). The main advantages and disadvantages of the currently existing methods and ways of its determination have been classified and analyzed. An analytically justified function of its maximum possible values under the dynamic loads action was obtained. The various factors influence on the DIF_u limit values for compressed concrete is taken into account using an integrated parameter – the well-known coefficient of elastic-plastic concrete properties k . The dependence of intermediate DIF values on the compressed concrete deformation rate under the different intensity dynamic loads action is proposed.

The effectiveness of the developed method of determining the DIF coefficient for compressed concrete according to the proposed dependence was evaluated by comparing the theoretical calculations results with individual researchers experimental data. Similar comparisons were also made with the calculations results performed according to well-known European methods of the CEB FIB.

Keywords: deformation model, concrete, deformation rate, specific potential energy, dynamic increase factor.

Вступ. Давно відомо, що навіть ті бетонні та залізобетонні конструкції, що запроєктовані на дію лише статичних або квазістатичних навантажень, у дійсності сприймають динамічні навантаження різної інтенсивності. Ідеться про окремі навантаження, пов'язані не тільки з певними технологічними процесами, але й так званими «позаштатними» або аварійними ситуаціями. Швидкість їх прикладання та швидкість деформування матеріалів і конструкцій при цьому можуть коливатися в доволі широких межах. Тому, зважаючи на думку переважної більшості дослідників [1-7], згідно з європейськими рекомендаціями [8, 9] зв'язок між типом навантаження та швидкістю деформування бетону \mathcal{E} можна подати як табл. 1.

Загалом бетон належить до групи пружно-пластичних матеріалів. Тому

цілком очевидно, що його основні фізико-механічні характеристики (міцність на стиск f_c і розтяг f_{ct} , модуль пружності E_c , відповідні критичні деформації ε_{c1} та ε_{ct1} тощо) будуть безпосередньо залежати від швидкості завантаження або швидкості деформування \mathcal{E} (рис. 1). Над встановленням таких залежностей і досі продовжують працювати багато дослідників. Однак виявленню основних закономірностей зазначених зв'язків перешкоджають доволі суттєві розбіжності в результатах експериментальних досліджень. Зазвичай їхня кількість зростає зі збільшенням швидкості деформування бетону та зумовлюється такими факторами:

- відсутністю єдиних стандартизованих методів випробувань динамічним навантаженням;

- використанням зразків різних за формою та геометричними розмірами;
- застосуванням дослідних зразків із відмінними видами та пропорціями компонентів (заповнювачів), а отже, різними статичними міцностями;
- випробуванням зразків різного

- віку, витриманих у різних температурно-вологісних умовах;
- визначенням статичної міцності бетону за різних статичних швидкостей його деформування;
- впливом різних інерційних ефектів та ефектів тертя.

Таблиця 1

Швидкість деформування бетону залежно від типу навантаження

Тип навантаження		Швидкість деформування $\dot{\epsilon}$, с^{-1}
Тривалої дії (повзучість)		$10^{-10} \dots 10^{-6}$
Статичні, квазістатичні		$10^{-6} \dots 10^{-5}$
Динамічні	Зіткнення з кораблями, транспортними засобами, вибух газу	$10^{-5} \dots 10^{-2}$
	Авіакатастрофи, ударні хвилі	$10^{-3} \dots 10^0$
	Землетруси	$10^{-2} \dots 10^1$
	Ракетні удари, падіння каменів, забивання паль	$10^{-1} \dots 10^2$
	Сильні вибухи	$10^{-1} \dots 10^4$
	Ядерні, термоядерні та астрофізичні вибухи	$10^2 \dots 10^8$

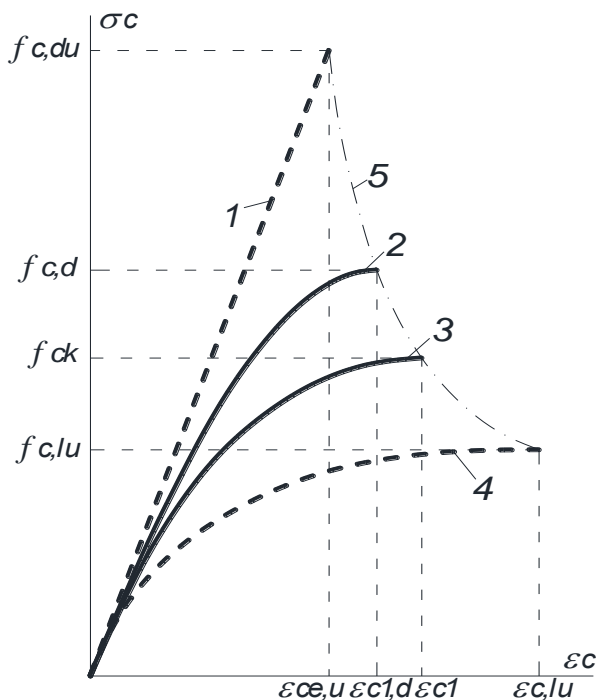


Рис. 1. Діаграми деформування стиснутого бетону $\sigma_c - \epsilon_c$ залежно від швидкості зростання деформацій: 1 – $\dot{\epsilon} \rightarrow \infty$; 2 – $\dot{\epsilon} = 10^2 \dots 10^{-2} \text{с}^{-1}$; 3 – $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \dots 10^{-6} \text{с}^{-1}$; 4 – $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$; 5 – крива граничних деформацій

Переважає більшість досліджень бетонних і залізобетонних елементів і конструкцій за динамічних навантажень завжди пов'язувалася безпосередньо чи опосередковано з коефіцієнтом динамічного зміцнення бетону (*DIF*). Тому всі пропонувані на сьогодні залежності з його визначення можна умовно поділити на три групи.

У дослідженнях першої групи коефіцієнт *DIF* пропонується визначати за тривалістю дії динамічного навантаження τ [10, 11]. За таких обставин урахувати вплив будь-яких факторів чи ефектів на величину коефіцієнта динамічного зміцнення бетону, як і його інші характеристики, практично неможливо.

До другої групи слід віднести функції, у яких коефіцієнт *DIF* розраховується за швидкістю зростання напружень $\sigma = d\sigma/dt$ [8, 9, 12]. Контролювати цей параметр в експериментальних дослідженнях вкрай складно, а про врахування впливу якихось факторів чи ефектів на величину коефіцієнта динамічного зміцнення бетону в цьому випадку взагалі не йдеться.

Найбільш поширеними можна вважати залежності третьої групи, що подані переважно як степеневі або логарифмічні функції [13-17]. У них коефіцієнт динамічного зміцнення бетону пов'язується зі швидкістю деформування бетону $\varepsilon = d\varepsilon/dt$, а вплив інерційних ефектів на коефіцієнт динамічного зміцнення бетону – з прискоренням деформування бетону $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ [18, 19]. Однак усі залежності цієї групи, як і функції двох попередніх груп, є чисто емпіричними. А тому їх використання в узагальнених моделях деформування бетону в бетонних і залізобетонних елементах і конструкціях залишається доволі проблематичним.

Зважаючи на вищезгадане, можна стверджувати, що пошук аналітично обґрунтованих залежностей коефіцієнта динамічного зміцнення бетону й надалі

залишатиметься одним з найважливіших завдань у теорії залізобетону.

Постановка мети і задач досліджень. Такі дослідження спрямовані на розроблення основ загальної моделі деформування бетону в залізобетонних елементах і конструкціях за дії динамічних навантажень. При цьому одним із ключових завдань слід вважати отримання аналітичної залежності коефіцієнта динамічного зміцнення бетону. Саме теоретично обґрунтована функція $DIF = f(\varepsilon)$ дасть змогу моделювати діаграму деформування бетону за дії динамічних навантажень будь-якої інтенсивності.

Основний матеріал досліджень

Методика досліджень. В основу таких досліджень покладено фізико-математичне моделювання процесів деформування бетонних і залізобетонних елементів і конструкцій загалом [20] і закон збереження потенціальної енергії деформування матеріалів за різних режимів їхнього завантаження зокрема.

Результати досліджень. Зазвичай за потенціальну енергію деформування матеріалу приймають енергію, що накопичується в еталонному зразку за його пружного деформування. Саме ця енергія дорівнює роботі, що виконується зовнішніми силами на переміщеннях, обумовлених згаданим деформуванням матеріалу. Інакше кажучи, робота, виконана зовнішнім навантаженням, перетворюється в потенціальну енергію деформування еталонного бетонного зразка. Відомо, що частина потенціальної енергії все ж таки втрачається або «розсіюється» у вигляді тепла при протіканні різних процесів, пов'язаних з деформуванням матеріалу самого зразка. Зазвичай ці втрати є незначними, тому ними повністю нехтують.

Розглянемо загальний випадок деформування еталонного зразка у вигляді елементарного паралелепіпеда розмірами $dx \times dy \times dz$ (рис. 2) з абсолютно

пружного матеріалу. Повну потенціальну енергію його деформування, що

накопичується при цьому, можна обчислити за відомим виразом

$$dU = \frac{1}{2} \sigma_x dz dy \cdot \varepsilon_x dx + \frac{1}{2} \sigma_y dz dx \cdot \varepsilon_y dy + \frac{1}{2} \sigma_z dx dy \cdot \varepsilon_z dz, \quad (1)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – поздовжні напруження та викликані ними поздовжні деформації матеріалу у напрямку осей x, y, z відповідно.

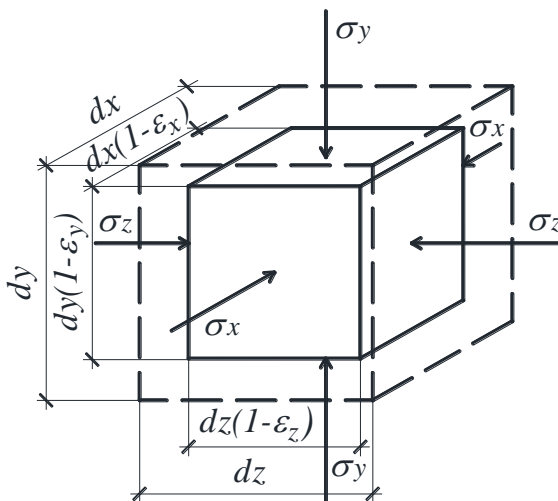


Рис. 2. Загальний випадок пружного деформування еталонного зразка

Важливо пам'ятати, що потенціальна енергія пружного деформування завжди накопичується у зворотній формі: при розвантаженні зразка вона знову переходить в енергію зовнішніх сил або ж перетворюється в кінетичну енергію.

Водночас величина питомої потенціальної енергії деформування u , що накопичується в одиниці об'єму матеріалу зразка dV , може бути розрахована за формулою

$$u = \frac{dU}{dV} = \frac{1}{2} (\sigma_x \cdot \varepsilon_x + \sigma_y \cdot \varepsilon_y + \sigma_z \cdot \varepsilon_z), \quad (2)$$

а в разі одновісного напружено-деформованого стану – за виразом

$$u_2 = \frac{dU}{dV} = \frac{1}{2} \sigma_z \cdot \varepsilon_z = \frac{1}{2} E_{co} \cdot \varepsilon_{c,du}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{f_{c,du}^2}{E_{co}}, \quad (3)$$

де E_{co} – початковий модуль пружності бетону;

$f_{c,du}$ та $\varepsilon_{c,du}$ – міцність стиснутого бетону та відповідні їй критичні деформації бетону за дії динамічних навантажень.

Загалом подібне деформування бетону можливе лише за його миттєвого завантаження $\dot{\varepsilon} \rightarrow \infty$, тобто коли пластичні деформації взагалі не встигають проявитися. У всіх інших випадках потенціальну енергію деформування стиснутого бетону необхідно розраховувати за діаграмою його деформування.

Так, за стандартизованого (квазістатичного) режиму завантаження (рис. 3) цю енергію пропонується обчислювати на основі неправильної дробово-раціональної функції $\sigma_c - \varepsilon_c$ [21-23] за виразом

$$u_1 = \frac{dU}{dV} = \int_0^{\varepsilon_{c1}} \sigma_c d\varepsilon_c = \int_0^{\varepsilon_{c1}} \left[\left(E_{co} \cdot \varepsilon_c - \frac{f_{ck}}{\varepsilon_{c1}^2} \cdot \varepsilon_c^2 \right) / \left(1 + (k-2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right) \right] d\varepsilon_c =$$

$$= \frac{f_{ck} \cdot \varepsilon_{c1}}{(k-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(k-1)^2}{(k-2)} - \left(\frac{k-1}{k-2} \right)^2 \cdot \ln(k-1) \right], \quad (4)$$

де ε_c – поточні деформації стиснутого бетону;

f_{ck} та ε_{c1} – міцність стиснутого бетону та відповідні їй критичні деформації бетону за дії стандартизованих статичних навантажень;

$k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck}$ – характеристика деформативності стиснутого бетону.

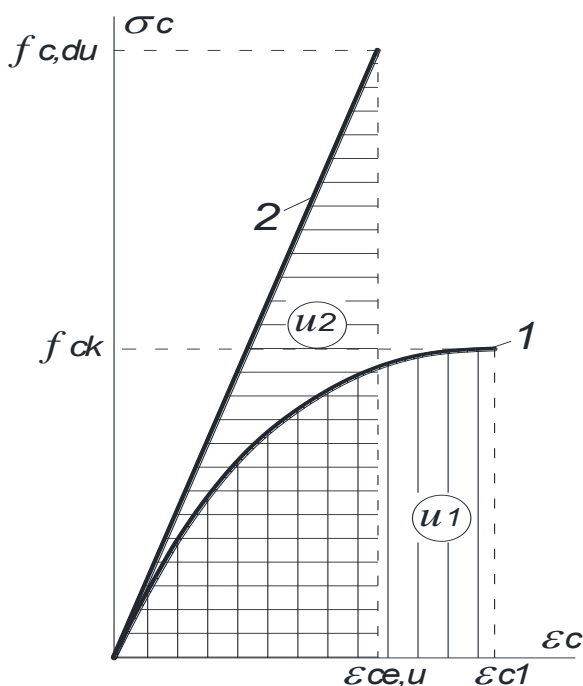


Рис. 3. Епюри потенціальної енергії граничного деформування бетону при завантаженні:

1 – стандартизованому короткочасному; 2 – миттєвому динамічному

Виходячи з гіпотези незмінності питомої потенціальної енергії граничного деформування (руйнування) бетону та при незалежності її від режиму завантаження самого бетону [24, 25] вирази (3) та (4) можна прирівняти, а граничні значення міцності стиснутого бетону за миттєвого прикладання динамічних навантажень, за

формулою (3), можна розрахувати за доволі простим виразом

$$f_{c,du} = \sqrt{2 \cdot E_{co} \cdot u}. \quad (5)$$

У такому випадку функція граничних значень коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону з урахуванням залежності (4) і після певних перетворень набуде такого вигляду:

$$DIF_u = \frac{f_{c,du}}{f_{ck}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{(k-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(k-1)^2}{(k-2)} - \left(\frac{k-1}{k-2} \right)^2 \ln(k-1) \right]}. \quad (6)$$

Формула (6) показує, що граничні значення коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону при його миттєвому завантаженні залежать лише від одного параметра – загально визнаного коефіцієнта пружно-пластичних

властивостей бетону $k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck}$. Гранично можливі значення коефіцієнта DIF для різних класів бетону за формулою (6) наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Граничні значення коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону

Клас бетону	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/35	C32/40	C35/45
DIF_u	2,829	2,603	2,398	2,254	2,134	2,031	1,943	1,876
Клас бетону	C40/50	C45/55	C50/60	C53/65	C56/70	C60/75	C65/80	C70/85
DIF_u	1,799	1,739	1,686	1,638	1,595	1,551	1,515	1,483
Клас бетону	C75/90	C80/95	C85/100	C90/105	C95/110	C100/115	C105/120	
DIF_u	1,45	1,426	1,398	1,374	1,353	1,33	1,313	

Зважаючи на граничні умови для коефіцієнта динамічного зміцнення бетону: $DIF = 1$ при $\varepsilon = 10^{-6} c^{-1}$; $DIF = DIF_u$ при $\varepsilon = 10^3 c^{-1}$, на підставі числового аналізу

результатів експериментальних досліджень [26, 27] було отримано універсальну залежність коефіцієнта DIF від швидкості деформування стиснутого бетону

$$DIF = DIF_u^{((1+\log(\varepsilon/\varepsilon_s))/9)^2} \quad \text{для} \quad \varepsilon \geq 10^{-6} c^{-1}, \quad (7)$$

де ε – швидкість деформування стиснутого бетону за дії динамічних навантажень;

ε_s – максимальна швидкість деформування стиснутого бетону за дії квазістатичних навантажень, $\varepsilon_s = 10^{-5} c^{-1}$.

Ефективність розробленої методики визначення коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону була оцінена шляхом порівняння результатів теоретичних розрахунків за виразом (7) з експериментальними даними окремих дослідників [26, 27]. Вона відображена на графіках рис. 4-6. Водночас аналогічні порівняння були проведені з результатами

розрахунків, виконаних за загальновідомими європейськими методиками ЄКБ ФІБ [8, 9]. Отримані результати однозначно демонструють, що пріоритет щодо точності визначення коефіцієнта DIF належить пропонованій методиці, в основу якої покладено енергетичну модель деформування бетону та залізобетону [24, 25].

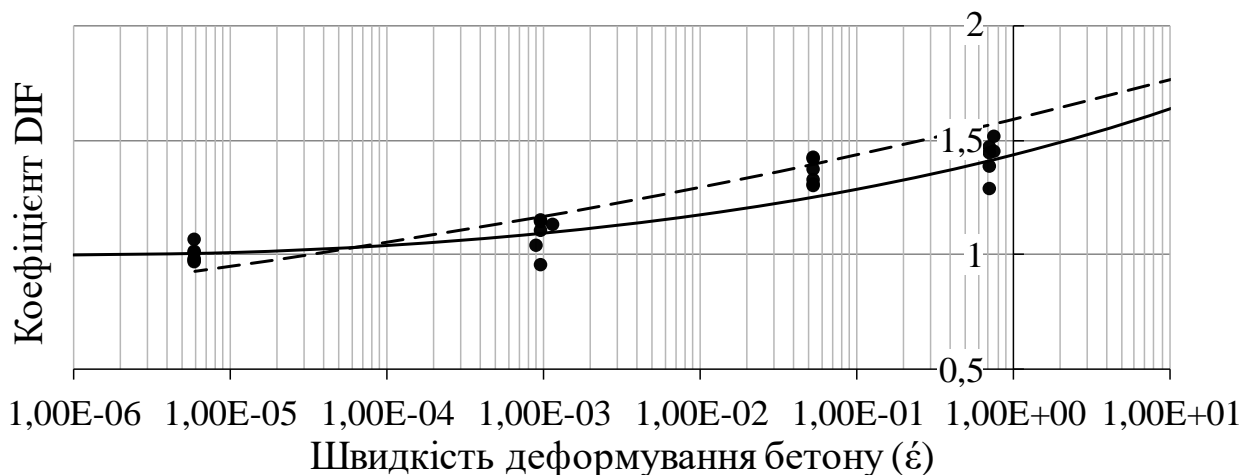


Рис. 4. Залежність DIF від швидкості деформування бетону міцністю $f_c = 26,89 MPa$:
 ● – за дослідями [26]; — – за формулою (7); - - - за СЕВ-FIP [8]

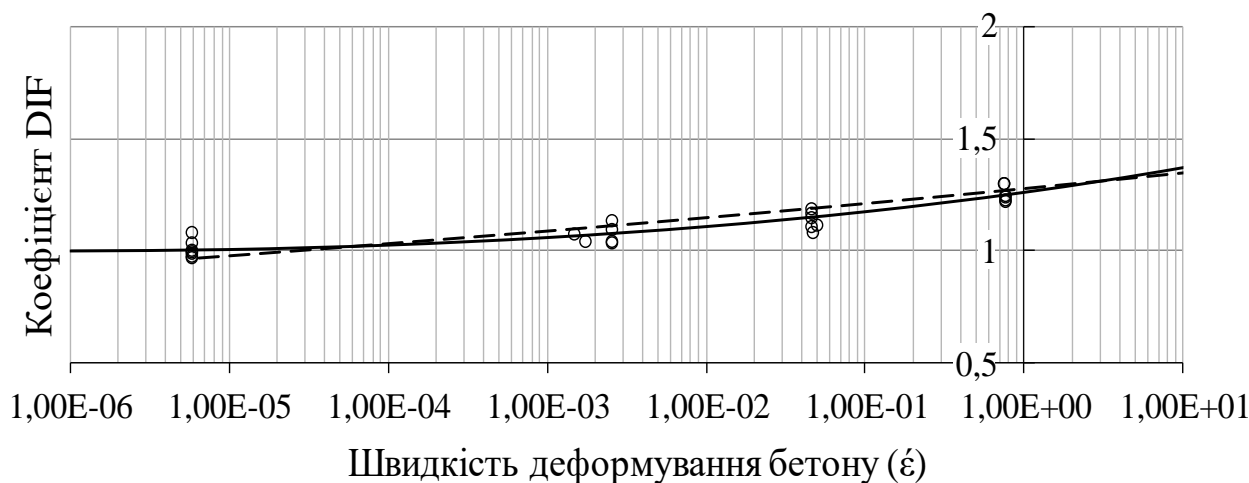


Рис. 5. Залежність DIF від швидкості деформування бетону міцністю $f_c = 60,32 MPa$:
 ○ – за дослідями [26]; — – за формулою (7); - - - за СЕВ-FIP [8]



Рис. 6. Залежність DIF від швидкості деформування бетону міцністю $f_c = 110,8 \text{ MPa}$:
 Δ – за дослідями [27]; — — за формулою (7); --- за СЕВ-FIP [8]

Висновки. Завдяки розробленій енергетичній моделі отримано аналітично обґрунтовану залежність граничних значень коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону DIF_u . Вкрай важливо, що ця залежність пов'язана лише з однією загальновідомою характеристикою деформативності стиснутого бетону за нормованих (стандартизованих) статичних випробувань – загально визнаним коефіцієнтом пружно-пластичних властивостей бетону $k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck}$. Більш того, отримана функція дає змогу прогнозувати не тільки проміжні значення

коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону DIF за будь-якої швидкості його деформування, але й весь процес деформування бетону в бетонних і залізобетонних елементах і конструкціях за дії динамічних навантажень різної інтенсивності.

Загалом можна стверджувати, що результати вищенаведених досліджень відкривають доволі широкі можливості в розробленні універсальної методики розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій за дії навантажень будь-якої інтенсивності та тривалості.

Список використаних джерел

1. Rüsç H. Stahlbeton – Spannbeton, Band 1: Werkstoffeigenschaften und Bemessungsverfahren. Düsseldorf: Werner-Verlag, 1972. 358 p.
2. Bischoff P. and Perry S. Compressive Behaviour of Concrete at High Strain Rates. *Materials and Structures*. 1991. Vol. 24, No. 6. P. 425-450. (SCOPUS).
3. Han N. Time Dependent Behaviour of High Strength Concrete: PhD Dissertation. Delft University of Technology, 1996. 317 p.
4. Ansell A. A Literature review on the shear capacity of dynamically loaded concrete structures. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, Concrete Structures. Report 89, 2005. 39 p.
5. Riisgaard B., Ngo T., Mendis P., Georgakis C. & Stang H. Dynamic Increase Factors for High Performance Concrete in Compression using Split Hopkinson Pressure Bar. In *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 2007. URL: <http://www.cprosam.dk/>.

6. Zhang X., Ruiz G., Yu R. C., Poveda E., Porrás R. Rate effect on the mechanical properties of eight types of high-strength concrete and comparison with FIB MC 2010. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 30. P. 301-308. (SCOPUS). doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.037.
7. Zhang Q. B., Zhao J. A Review of Dynamic Experimental Techniques and Mechanical Behaviour of Rock Materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014. Vol. 47. P. 1411-1478. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0463-y>.
8. CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. Lausanne: Comité Euro-International du Béton, 1991. 437 p.
9. Fib Model Code 2010. Final draft. *Fib Bulletin* 66. 2012. Vol. 2. 377 p.
10. Баженов Ю. М. Бетон при динамическом нагружении. Москва: Стройиздат, 1970. 271 с.
11. Grigoriev A. S., Shilko E. V., Skripnyak V. A., Chernyavsky A. G., Psakhie S. G. The numerical model of dynamic mechanical behavior of brittle materials based on the concept of the kinetic theory of strength. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017. No. 3. P. 75-99. URL: <http://dx.doi.org/10.15593/perm.mech/2017.3.05>.
12. Fujikake K., Mizuno J., Suzuki A., Ohno T., Nonak T. Dynamic strain softening of concrete in compression under rapid loading. *WIT Transactions on the Built Environment: Structures under Shock & Impact*. 1998. Vol. 32. P. 481-491. URL: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-nvironment/35/6534>.
13. Dilger W. H., Koch R. and Kowalczyk R. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates. *ACI Journal*. 1984. Vol. 81, No. 1. P. 73-81. (SCOPUS).
14. Malvern L. E., Jenkins D. A., Tang T., Ross C. A. Dynamic compressive testing of concrete. *Proceedings of the Second Symposium on The Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures*, 15-18 April 1985. Panama City Beach, Florida, 1985. P. 194-199.
15. Tedesco J. W., Ross C. A. Strain-rate-dependent constitutive equations for concrete. *ASME J. Press. Vessel Technol.* 1998. Vol. 120. P. 398-405. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1115/1.2842350>.
16. Grote D. L., Park S. W., Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain-rates and pressures: I. Experimental characterization. *International Journal of Impact Engineering*. 2001. Vol. 25. P. 869-886. (SCOPUS). URL: [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00020-3).
17. Long K. S., Kasmuri M., Hasan A. S. Z. and Hamid R. Dynamic Increase Factor of High Strength Concrete with Silica Fume at High Strain Rate Loading. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 857. P. 299-304. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.857.299>.
18. Lee S., Kim K.-M., Cho J.-Y. Investigation into Pure Rate Effect on Dynamic Increase Factor for Concrete Compressive Strength. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 210. P. 11-17. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.042>.
19. Sun B., Chen R., Ping Y., Zhu Z., Wu N., Shi Z. Research on Dynamic Strength and Inertia Effect of Concrete Materials Based on Large-Diameter Split Hopkinson Pressure Bar Test. *Materials*. 2022. Vol. 15. 2995. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.3390/ma15092995>.
20. Ромашко В.М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Львів, 2018. 533 с.
21. Ромашко В. Н. Обобщенная модель деформирования железобетонных элементов и конструкций. *Міжнародний науковий журнал (International scientific journal)*. 2016. Вип. 3. С. 84-86. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2016_3_23.
22. Romashko V., Romashko O. The construction features of the deformation and force model of concrete and reinforced concrete resistance. *MATEC Web of Conf*. 2017. Vol. 116. 02028. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602028>.
23. Romashko V. and Romashko O. Fundamentals of the General Theory of Resistance of Reinforced Concrete Elements and Structures to Power Influences. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 534-540. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.534>.

24. Romashko V. M. and Romashko O. V. Energy resource of reinforced concrete elements and structures for the deformation-force model of their deformation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 708. 012068. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012068>.

25. Romashko V., Romashko-Maistruk O. Strength resource calculation of the reinforced concrete elements according to the energy criterion. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 269-276. (SCOPUS). URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.034>.

26. Cowell W. L. Dynamic properties of plain Portland cement concrete. Technical Report No. R447, DASA 130181. US Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, 1966. P. 51.

27. Othman H., Marzouk H. Strain Rate Sensitivity of Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*. 2016. Vol. 113, No. 2. P. 143-150. (SCOPUS). doi:10.14359/51688461.

Ромашко-Майструк Олена Василівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Ромашко Василь Миколайович, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3448-7489. Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Romashko-Maistruk Olena Vasylivna, PhD(Tech.), associate professor at the Department of Industrial, Civil Construction and Engineering Structures, National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko Vasyl Mykolayovych, D. Sc.(Tech.), associate professor, head of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics, National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3448-7489. Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Статтю прийнято 27.09.2023 р.

УДК 624.012.45

ПРО МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО КАРКАСА ПРИ ДІЇ ПОЖЕЖІ

Асп. М. Альмохамад

ABOUT THE METHOD OF SIMULATING THE PROGRESSIVE COLLAPSE OF A REINFORCED CONCRETE FRAME UNDER THE FIRE IMPACT

Postgraduate Student M. Almohamad

Анотація. У роботі запропоновано метод, а на його базі обґрунтовано методіку моделювання прогресуючого обвалення каркасних залізобетонних будинків із використанням явного методу інтегрування рівнянь динаміки. Виконано чисельне дослідження монолітного залізобетонного каркаса при дії стандартного режиму пожежі. Обґрунтовано алгоритм визначення знижених механічних характеристик композитних шарів планарних скінченних елементів. Отримано результати у вигляді полів вертикальних переміщень, різке прирощування значень яких є ознакою настання прогресуючого обвалення споруди.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, пожежа, тепловий вплив, метод скінченних елементів, переміщення.

Abstract. In his paper a method of mathematical modeling of progressive destruction based on the example of an existing 17-story building using an explicit method of integrating the dynamics equations was proposed. A set of provisions and assumptions was substantiated for mathematical modeling of the progressive destruction of the 17-story monolithic reinforced concrete frame. The numerical analysis was performed using the finite element method in the LS DYNA software complex. A fire under the standard mode (150 min – I degree of fire resistance) in accordance with Ukrainian standards was considered as an emergency load, which involves taking into account nonlinear processes of changes in physical and mechanical characteristics of materials and changes in temperature. Five scenarios of fire development in the premises of the building are considered, based on which the algorithm for determining the reduced mechanical characteristics of the composite layers of planar finite elements approximating the calculated area of the structural system of the building is substantiated. It is shown that in all cases of the five fire scenarios, progressive destruction covers parts and elements of the structural system of the building that go beyond the premises where the fire develops, as well as elements whose mechanical characteristics are not subject to reduction due to fire. The results demonstrating the destruction of the elements in a cascade manner which starts with the most weakened and spills over to the elements that perceive a greater load were obtained. It is noted that the elements that do not have reduced mechanical characteristics are destroyed due to the increase in bending moments from deformed overlaps with support columns and diaphragms, which have given rise to failure. As a sign of the onset of progressive collapse, a rapid increase in displacements is adopted. They spread both in plan and along the height of the building, and these displacements prevail by several orders over displacements obtained in normal (non-emergency) conditions. At the same time, the appearance of signs of progressive collapse became possible only when the load was increased by 3.72 times.

Keywords: progressive collapse, fire, thermal effect, finite element method, displacement.

Вступ. Основною особливістю руйнуючого впливу пожежі на конструкції, безумовно, є тепловий вплив, який має характер поступового нагрівання протягом порівняно тривалого проміжку часу, що у свою чергу призводить як до зменшення фізико-механічних характеристик матеріалів несучих конструкцій, так і появи додаткових температурних зусиль. Крім того, пожежа розвивається в межах певного приміщення і поширюється на інші приміщення після подолання перешкод у вигляді огорожувальних конструкцій. За усталеними підходами при ординарному розрахунку вогнестійкості тепловий вплив розглядається як рівномірний і однаковий на всі поверхні конструкцій, що безпосередньо прилягають до простору приміщення, де розвивається пожежа.

Також важливою особливістю при такому підході є використання для відтворення теплового впливу спеціальної температурної кривої пожежі, яку ще називають стандартною температурною кривою [1-3]. Така крива є логарифмічною і не має ділянки спадання температури. Тобто пожежа за таких умов може тільки розвиватися, а її усереднена температура тільки підвищуватися. Такий підхід є поширеним, не дивлячись на наявність інших ефективних інструментів, що дають змогу моделювати тепловий вплив безпосередньо, враховуючи наявні геометричні параметри приміщень, характеристики прорізів, матеріали огорожувальних конструкцій і пожежне навантаження. Разом з тим формалізований підхід дає змогу змоделювати аварійне

навантаження типу пожежі у відповідності з фізичними процесами та стандартним температурним режимом, що відповідає нормативним документам України [1].

Ще однією важливою особливістю, пов'язаною з прогресуючим обваленням унаслідок пожежі, є те, що поширення пожежі не обмежується з часом, а поступово перекидається на суміжні приміщення не тільки в межах поверху, а й на інші поверхи зверху та знизу. Основні особливості розвитку та поширення пожежі в будівлях схематично показано на рис. 1.

За таких умов прогресуюче обвалення відбудеться в певний момент часу обов'язково. Через це важливо обмежити часовий проміжок, у межах якого може бути оцінена можливість прогресуючого обвалення. У зв'язку з цим необхідно мати методичку розрахунку можливості виникнення прогресуючого обвалення унаслідок теплової дії пожежі на будівельні конструкції, що враховує нелінійну зміну температури, поширення пожежі в будівлі, а також нелінійну зміну фізико-механічних характеристик.

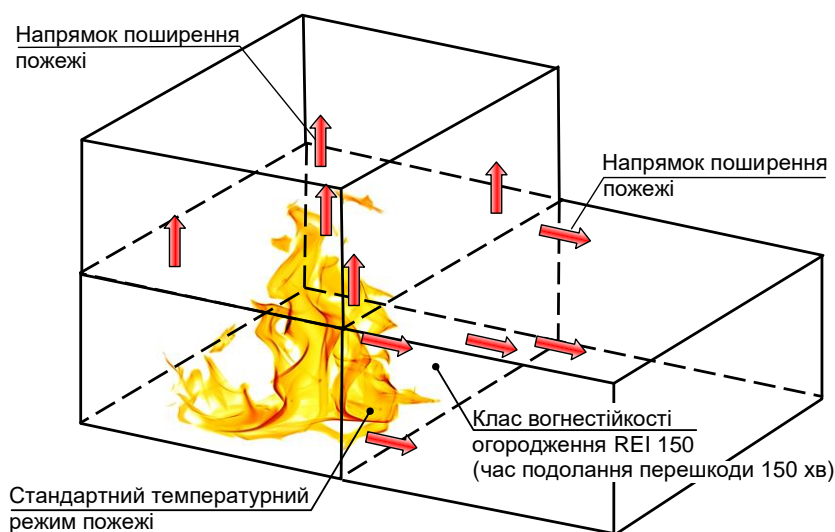


Рис. 1. Схема розвитку та поширення пожежі в будівлі

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Звертаючись до теми світового досвіду оцінювання прогресуючого обвалення будівель унаслідок впливу пожежі, слід зауважити, що наявні дослідження – теоретичні, чисельні та експериментальні – все ще не відповідають на всі проблемні питання. Так, зокрема, і українське нормативне поле на сьогодні досі не має затверджених нормативних документів, які б регламентували процедури, за якими мають працювати проєктувальники.

Якщо ж відзначити позитивний досвід чисельного аналізу будівель, то слід згадати роботу Цзянь Цзянь і Гуо-Цян Лі [4],

присвячену чисельному аналізу тривимірних сталевих каркасних конструкцій із залізобетонними перекриттями під час локальних пожеж. Аналіз, виконаний у програмному комплексі LS DYNA, базується на моделі восьмиповерхової будівлі, що імітує випробування в Кардінгтоні [5], з фокусом на різних сценаріях пожежі та співвідношеннях навантажень. Отримані результати свідчать про те, що квазістатична поведінка під час тривалої пожежі може бути ефективно змодельована в динамічному аналізі. Регулювання співвідношення навантаження демонструє вплив на поведінку обвалення,

підкреслюючи необхідність 3D-моделювання для точного його зображення. На критичну температуру руйнування помітно впливають локалізація пожежі та співвідношення навантажень. Загалом це дослідження надає цінну інформацію про поведінку конструкцій під час пожеж, проте тільки локально розташованих, і лише для сталезалізобетонних будівель.

У роботі Юнь Чжоу та ін. [6] відображені результати як експериментальних випробувань вузлів збірних каркасів, так і повірочний розрахунок методом скінченних елементів. Це дослідження фокусується на поведінці збірних залізобетонних каркасних будинків при прогресуючому обваленні за умови виконання рамних вузлів – сценарій, який досить рідко вивчався під час вибуху, пожежі або ударних навантажень від транспортних засобів. Дослідження проведені на напівмасштабних рамних вузлах сполучень колон і балок з порівнянням зі звичайними залізобетонними зразками з шарнірними вузлами. За результатами досліджень відзначено, що зразки з шарнірними вузлами продемонстрували нижчу пікову міцність, зменшене кінцеве переміщення та меншу пластичність порівняно зі зразками з рамними вузлами. Це дослідження висвітлює необхідність покращення характеристик конструкцій на випадок прогресуючого обвалення і пропонує цінну інформацію для практичного застосування.

Дослідження [7] демонструє аналіз механізмів обвалення залізобетонних конструкцій під впливом різних температур і способи підвищення вогнестійкості бетонних будівель. У той час, як попередні дослідження були зосереджені на виборі матеріалів і деталізації, ця робота підкреслює важливість взаємодії між цегляними заповнювачами стін і елементами каркаса залізобетонних конструкцій під час пожежі. Акцентується увага на необхідності врахування таких факторів, як навантаження, місце пожежі,

інтенсивність і тривалість при моделюванні впливу пожежі на повномасштабні житлові будинки. Пропонується використовувати скінченно-елементний аналіз для врахування комбінованого впливу навантаження і високої температури, а також дослідження перехідних станів для точного моделювання підвищення температури.

Підсумовуючи результати, отримані в перелічених роботах, слід зазначити, що робіт, присвячених оцінюванню прогресуючого обвалення монолітних каркасних будинків унаслідок аварійної дії пожежі з урахуванням наведених вище нелінійностей на сьогодні написано досить небагато. Оскільки проведення натурних експериментальних досліджень є дуже дорогим і непрактичним завданням з огляду на різноманіття каркасних монолітних будинків і діючих на них сполучень навантажень, відчувається об'єктивна необхідність у подальшому розвитку підходів чисельного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) залізобетонних каркасів при дії пожежі та пошуках методів моделювання прогресуючого обвалення.

Визначення мети та завдання дослідження. *Метою цього дослідження є побудова методу моделювання прогресуючого обвалення каркасних будинків з монолітного залізобетону внаслідок дії пожежі, що реалізується шляхом динамічного чисельного аналізу та з урахуванням стандартного температурного режиму пожежі. Об'єкт дослідження – аналіз процесів поширення вогню та зміни напружено-деформованого стану монолітних залізобетонних каркасів при дії аварійних пожежних навантажень. Предмет дослідження – прогресуюче обвалення монолітних залізобетонних каркасних будинків внаслідок пожежі. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:*

1. Обґрунтувати метод, а на його основі побудувати методику моделювання

прогресуючого обвалення каркасних монолітних будинків з використанням явного динамічного аналізу шляхом скінченно-елементного моделювання та врахуванням нелінійних процесів зміни фізико-механічних характеристик і зміни температури.

2. Проаналізувати компоненти напружено-деформованого стану системи та сценарії розповсюдження вогню з метою визначення ознаки настання прогресуючого обвалення будівлі.

Методика дослідження. У зв'язку з вищевикладеним пропонується така процедура оцінювання можливості прогресуючого обвалення будівлі внаслідок впливу пожежі:

1. Виділяється певне приміщення з огороженням із однаковим найбільшим класом вогнестійкості.

2. У межах виділеного приміщення влаштовуються всі несучі будівельні конструкції зі встановленим найбільшим класом вогнестійкості, який визначає час, протягом якого має бути виключена ініціація прогресуючого обвалення.

3. Розв'язується теплова задача для кожного з несучих елементів і визначаються знижені фізико-механічні характеристики залізобетонних конструкцій як наслідок їхньої деградації через тепловий вплив пожежі.

4. Складається загальна розрахункова схема каркаса будівлі з елементами зі зниженими характеристиками в межах виділеного приміщення.

5. Після прикладання всіх постійних і тимчасових навантажень згідно з діючими нормативними документами проводиться розрахунок такого каркаса з урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей.

6. Фіксується настання або ненастання прогресуючого обвалення за наявністю «великих» переміщень системи. Оскільки при розрахунку на аварійні сполучення навантажень не висуваються вимоги щодо граничних значень переміщень, при виборі «великих»

переміщень, які будуть показувати настання прогресуючого обвалення, треба орієнтуватися на швидкість приросту переміщень на кожному кроці та слідкувати за перетворенням схеми в геометрично змінювану.

При реалізації розрахунку використано такі припущення та гіпотези:

- розрахунок можливості прогресуючого обвалення будівлі проводиться в момент часу впливу стандартного температурного режиму пожежі 150 хв (як найбільшого для будівель І ступеня вогнестійкості згідно з класифікацією ДБН В.1.1.7:2016 [1]) із урахуванням усіх постійних і тимчасових навантажень згідно з вимогами ДБН В.1.2-2:2006 [8] як для аварійного сполучення, тобто зменшенням їхніх значень [3, 8, 9]. У випадку ненастання швидкоплинних деформацій, що розповсюджуються на всю або значну частину будівлі, чи/або неперетворення моделі в геометрично змінювану корисні навантаження збільшуються до того моменту, як відмічена ознака прогресуючого обвалення не буде виконана;

- зменшення властивостей бетону та арматурної сталі відбувається при врахуванні теплового впливу пожежі тільки у приміщенні з пожежею з урахуванням наявності інших огорожувальних конструкцій;

- для встановлення знижених фізико-механічних характеристик арматурної сталі та бетону розв'язується теплова задача для кожного несучого елемента конструкції відповідно до рекомендацій [3, 9];

- для визначення НДС у конструкціях будівлі застосовується явний метод інтегрування загальних рівнянь динаміки при її апроксимації за методом скінченних елементів;

- як скінченні елементи розглядаються планарні елементи типу оболонки Беличко-Цая, параметри напружено-деформованого стану визначаються інтегруванням у кожній точці інтегрування за товщиною планарного елемента. Цей

елемент має шарувату композитну структуру для врахування положення шарів бетону та шарів із арматурою (рис. 2);

- кожен шар планарного елемента має знижені характеристики міцності залежно від температури нагрівання цього шару, що має усереднене значення в його межах;

- як модель матеріалу використовується модель бетону та арматурної сталі, розробленої спеціально для врахування настанов, що наведені в нормах [3]. Ці моделі враховують появу пластичних деформацій і їхній вплив при розвантаженні та повторному навантаженні конструктивних систем на основі кінематичної теорії пластичності, а також теорії міцності бетону з урахуванням появи тріщин у точках деформування та інтегрування планарних СЕ.

При вивченні прогресуючого обвалення будівлі використовується комп'ютерна система LS-DYNA.

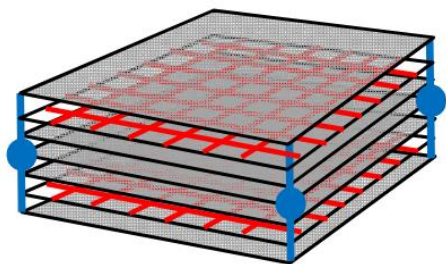


Рис. 2. Схема розташування шарів у планарному скінченному елементі

Основна частина дослідження. При моделюванні прогресуючого обвалення будівлі, зведеної на основі залізобетонних конструкцій, була використана модель залізобетону з властивостями, рекомендованими в настановах норм [3]. При цьому ця модель описує комплексно і бетон, і сталеву арматуру, процентне співвідношення між якими задається опціонально [10].

Для врахування зниження міцності арматурної сталі під час її нагрівання

початкова міцність помножується на коефіцієнт зниження міцності:

$$f_{sy,t}(\theta) = k_s(\theta) f_{yk,t}, \quad (1)$$

де $k_s(\theta)$ – коефіцієнт зниження міцності арматури залежно від температури.

Як модель матеріалу сталевій арматурі використовується матеріал, що враховує появу пластичних деформацій. Діаграми деформування такого матеріалу відповідають рекомендаціям другої частини Eurocode 2 [3], форма яких включає ділянку зростання, горизонтальну ділянку, а також спадну ділянку. При обчисленні нелінійних деформацій звичайної та попередньо напруженої арматурної сталі можна визначити зниження межі пропорційності залежно від температури.

Для визначення знижених характеристик міцності бетону в результаті його нагрівання початкова міцність помножується на відповідний коефіцієнт:

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) f_{ck,t}, \quad (2)$$

де $k_{c,t}(\theta)$ – коефіцієнт зниження міцності бетону залежно від температури.

При моделюванні прогресуючого обвалення будівлі, зведеної на основі залізобетонних конструкцій, було розглянуто багатоповерхову будівлю, наведену на рис. 3. Цей об'єкт являє собою 17-поверховий житловий будинок, виконаний у монолітному залізобетонному безригельному каркасі з такими перерізами конструктивних елементів: колони 400×400 мм, 400×800 мм, 400×700 мм, 400×600 мм; плити перекриттів товщиною 220 мм.

При дослідженні прогресуючого обвалення такої будівлі були розглянуті сценарії виникнення та розвитку пожежі в окремих приміщеннях, огорожених вогнестійкими огорожувальними конструкціями (цегляними стінами, клас вогнестійкості яких не менше REI 150). На рис. 4 наведені локації цих приміщень на плані першого поверху.



Рис. 3. Житловий комплекс «Америка» (м. Львів, Україна)



Рис. 4. Осередки виникнення пожеж на плані першого поверху

На рис. 5, а наведено конструктивну систему будівлі, що являє собою каркас будівлі у спрощеному вигляді, а також розрахункову модель у скінченно-елементній формі (рис. 5, б).

Використовуючи схему на рис. 4, було виділено елементи (рис. 6), характеристики міцності бетону і арматури яких буде знижено в результаті теплового впливу пожежі.

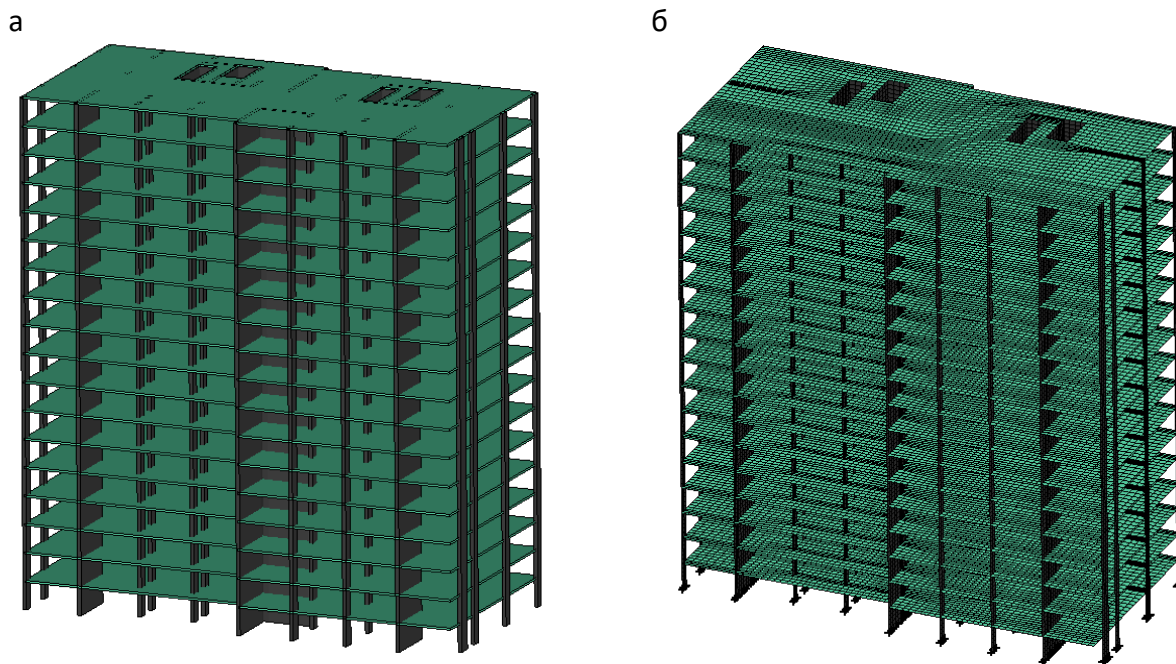


Рис. 5. Конструктивна система будівлі (а) і її розрахункова модель (б)

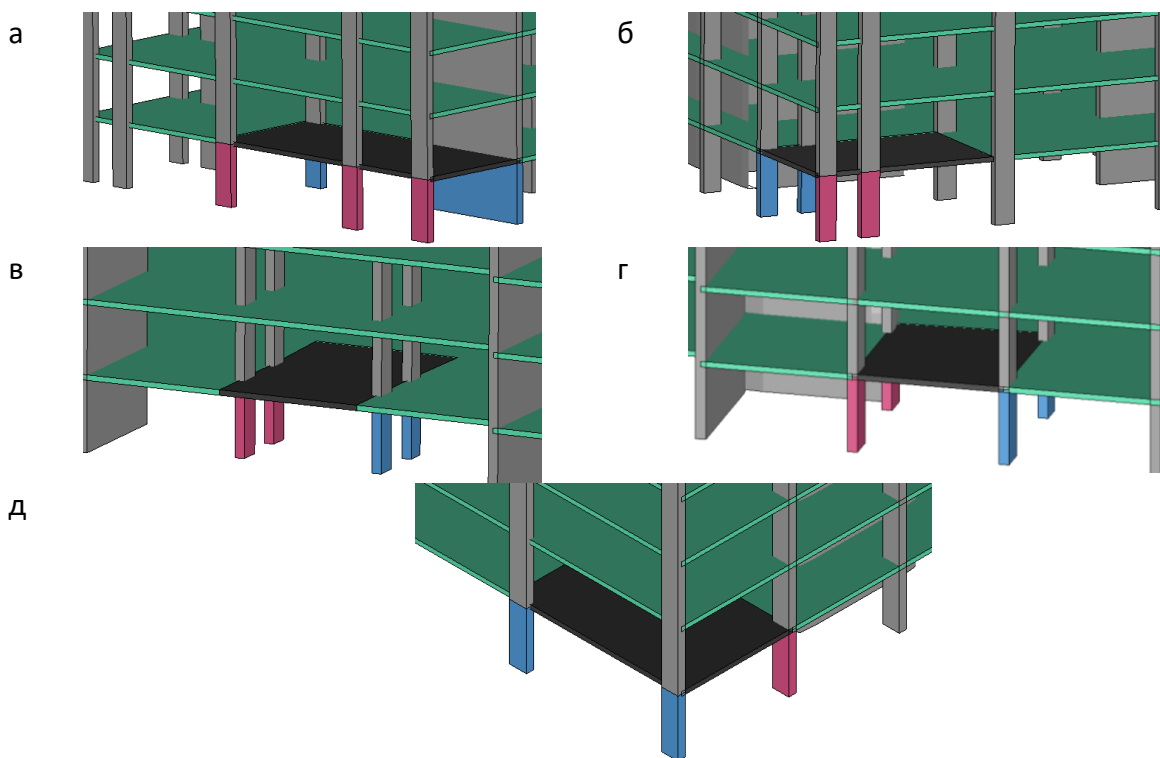


Рис. 6. Елементи у приміщеннях із пожежею зі зниженими механічними характеристиками моменту часу 150 хв впливу стандартного температурного режиму пожежі згідно зі сценаріями пожежі (рис. 4): а – перший випадок; б – другий випадок; в – третій випадок; г – четвертий випадок; д – п'ятий випадок

Для встановлення характеристик матеріалів елементів конструктивної системи було встановлено характеристики матеріалів сталі та бетону в нормальному стані. Бетон конструкцій прийнято класу С25/30, арматура А500С.

При визначенні знижених характеристик міцності внутрішніх шарів елементів залізобетонних конструкцій у приміщенні з пожежею в момент часу 150 хв теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі були використані результати розв'язання теплової задачі. Усі елементи вбудовані у стіни з газобетонних блоків, тож усі вони відчувають односторонній тепловий вплив з боку пожежного середовища з підвищеною температурою. Схема теплового впливу наведена на рис. 7.

Математична модель процесу теплопередачі в елементі залізобетонної конструкції відома з роботи [6]. Ця математична модель заснована на застосуванні нестационарного диференціального рівняння теплопровідності:

$$c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \quad (3)$$

де $c(\theta) = \rho(\theta)c_p(\theta)$ – питома об'ємна теплоємність бетону.

Для розрахунку також необхідно задати початкову температуру розрахункової області та параметри граничних умов. Параметри граничних умов наведені в табл. 1.

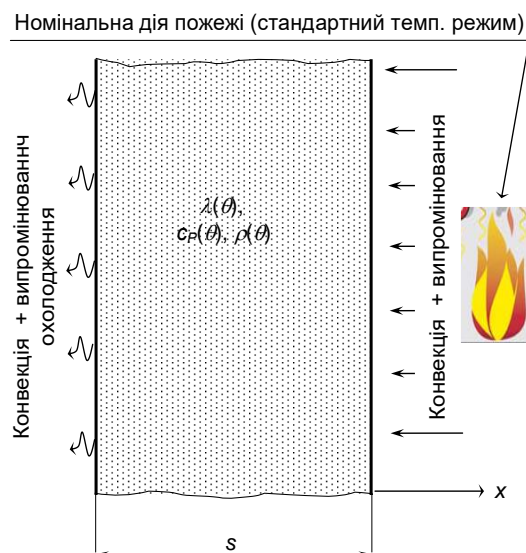


Рис. 7. Узагальнена розрахункова схема при односторонньому нагріванні елементів, які зазнають теплового впливу пожежі

Таблиця 1

Параметри граничних умов для елементів залізобетонного каркаса

Параметр	Позн.	Од. вим.	Вел.	Посилання
Обігрівна сторона				
Конвективна складова коефіцієнта теплообміну	α_c	Вт/(м ² °С)	25	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012
Ступінь чорноти	ϵ		0,7	ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012
Необігрівна сторона				
Коефіцієнт теплообміну	α	Вт/(м ² °С)	9	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012

Для розв'язання задачі теплопровідності за методом кінцевих різниць необхідно задатися початковими даними. Згідно з розробленою методикою були встановлені такі початкові дані:

- початкова температура $\theta_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$;
- просторовий крок інтегрування $\Delta h \sim 0.025\text{ м}$;
- часовий крок інтегрування – $\Delta t = 60\text{ с}$.

У результаті розрахунку були отримані температурні розподіли, подані на рис. 8.

Слід зазначити, що на необігрівній стороні цих елементів температура не

перевищує $140\text{ }^\circ\text{C}$. Це означає, що за теплоізолювальною здатністю граничний стан втрати вогнестійкості не настає. Так само визначений клас вогнестійкості, за табл. N.B.1.1 ДСТУ-Н Б EN 1996-1-2:2012, для газобетонних стін товщиною 250 мм (без штукатурки) становить EI 150, що також вказує на відсутність втрати вогнестійкості огороження приміщення. Тож можна зробити висновок, що пожежа не поширюється за межі приміщень, і зниження характеристик міцності можна враховувати тільки для елементів, що знаходяться в межах огороження приміщення.

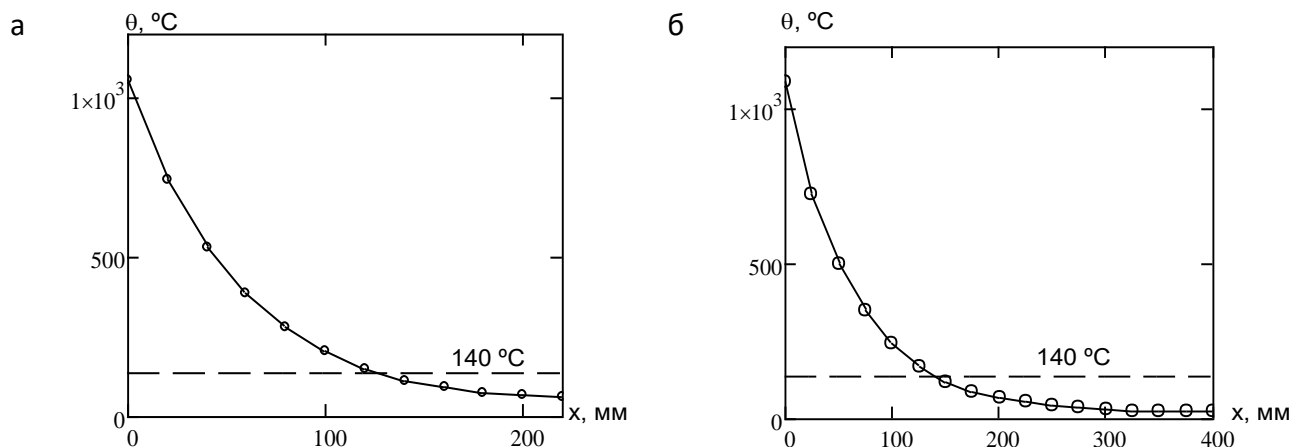


Рис. 8. Температурні розподіли по перерізу залізобетонної плити перекриття (а) і колони, вмонтованої в цегляну стіну (б) на 150 хв розвитку «стандартної» пожежі

При визначенні знижених характеристик міцності внутрішніх шарів елементів залізобетонних конструкцій використовуються усереднені характеристики шарів композитних планарних елементів, показаних на рис. 9. Для кожного з шарів, враховуючи середнє значення температури, були встановлені відповідні знижені фізико-механічні характеристики, наведені в табл. 2-3.

Прикладені тимчасові корисні навантаження множились на коефіцієнт

зниження навантаження при пожежі $\eta_{fi} = 0.7$ [3]. Рівномірно розподілене корисне навантаження на плиту перекриття з урахуванням тимчасових перегородок склало 6.3 кН/м^2 . Знижене навантаження, що прикладається в моделі, становить 4.41 кН/м^2 . Таке навантаження прикладається від нуля до заданого значення рівномірно протягом 3 хв, перед цим протягом 1 хв прикладається власна вага конструктивної системи.

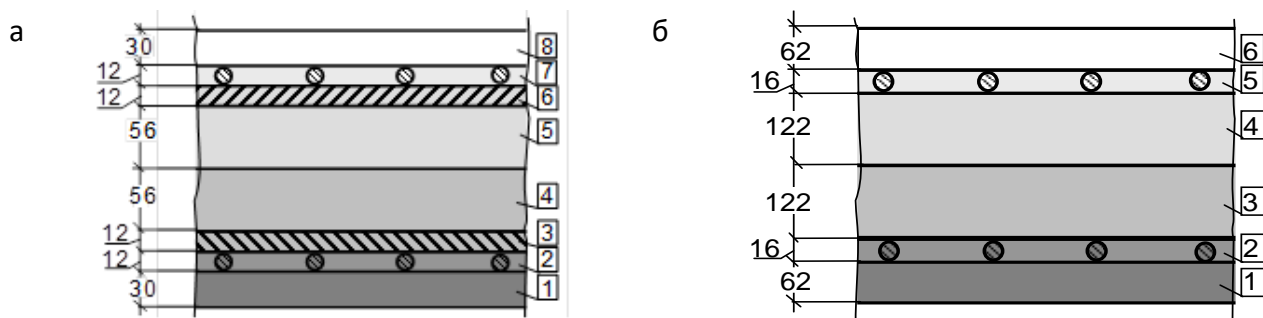


Рис. 9. Розташування композитних шарів у планарних елементах для моделювання каркаса будівлі: а – перекриття; б – колонна

Таблиця 2

Механічні характеристики шарів композитного планарного елемента для моделювання перекриттів

Номер шару	Модуль пружності бетону, ГПа	Межа міцності бетону $f_{ck,t,\theta}$, МПа	Гранична деформація $\epsilon_{c1,\theta}$	Межа міцності арматури $f_{sy,\theta}$, МПа	Процент армування
1	0.14	2.345	0.025	-	0
2	0.636	9.681	0.023	110.4	0.047
3	1.4	12.7	0.014	187.4	0.047
4	3.53	16.9	0.0072	-	0
5	6.609	19.7	0.0045	-	0
6	8.376	20	0.0036	500	0.047
7	8.677	20	0.0034	500	0.047
8	10.84	20	0.0027	-	0

Таблиця 3

Механічні характеристики шарів композитного планарного елемента для моделювання колон і діафрагм

Номер шару	Модуль пружності бетону, ГПа	Межа міцності бетону $f_{ck,t,\theta}$, МПа	Гранична деформація $\epsilon_{cu1,\theta}$	Межа міцності арматури $f_{sy,\theta}$, МПа	Процент армування
1	0.329	5.5	0.025	-	0
2	3.02	16.3	0.0081	232	0.0088
3	4.8	18.6	0.0051	-	0
4	10.4	20	0.0029	-	0
5	11.7	20	0.00255	500	0.0088
6	11.8	20	0.0025	-	0

Результати розрахунків при дії власної ваги та корисного навантаження при нормальних умовах наведені у вигляді полів вертикальних переміщень на рис. 10. Цей розподіл показує відсутність асиметричних значень переміщень вузлів сітки СЕ в осередках виникнення пожежі, а їхні абсолютні значення відрізняються від переміщень частин будівлі поза осередками не більш ніж на 5%. Також розрахункова схема не набула геометричної змінюваності. Можна констатувати відсутність прогресуючого обвалення.

Для дослідження умов і характеру обвалення будівлі від дії тільки статичних

навантажень був виконаний відповідний розрахунок зі значно підвищеними значеннями навантажень тільки в лівій частині будівлі. На рис. 11 показана деформована схема з ознаками прогресуючого обвалення будівлі. На цій схемі видно, що найбільш вразливою ділянкою будівлі до прогресуючого обвалення є ліва частина будівлі. Вигляд ізополів переміщень асиметричний і відрізняється на декілька порядків від переміщень зі звичайним навантаженням. Так, максимальні переміщення для такого випадку склали 4636 мм (порівняно з 22 мм при нормальних умовах).

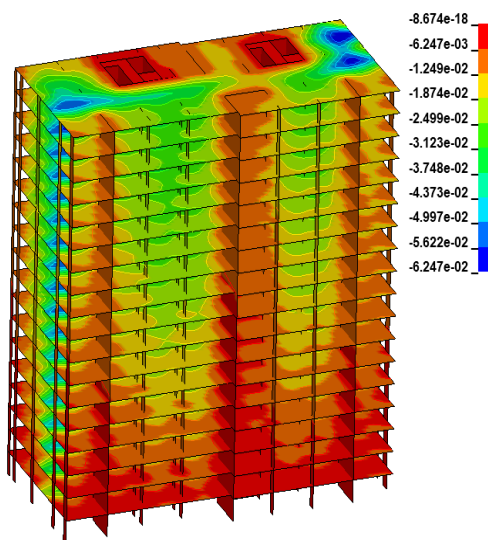


Рис. 10. Розподіл вертикальних переміщень (м) при нормальних умовах

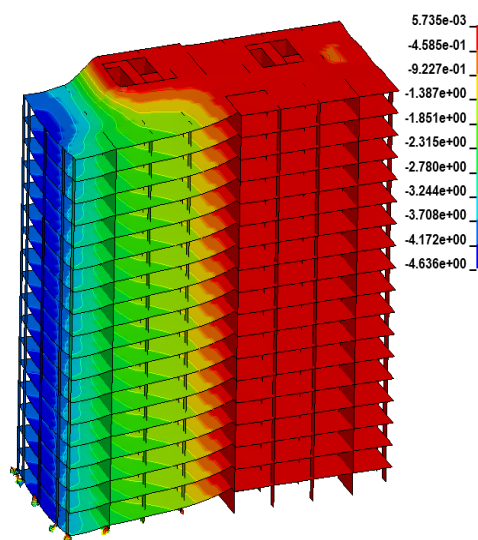
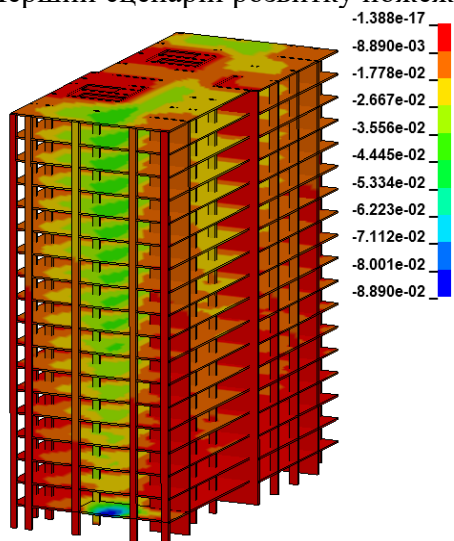


Рис. 11. Розподіл вертикальних переміщень (м) при настанні прогресуючого обвалення будівлі при дії підвищених статичних навантажень

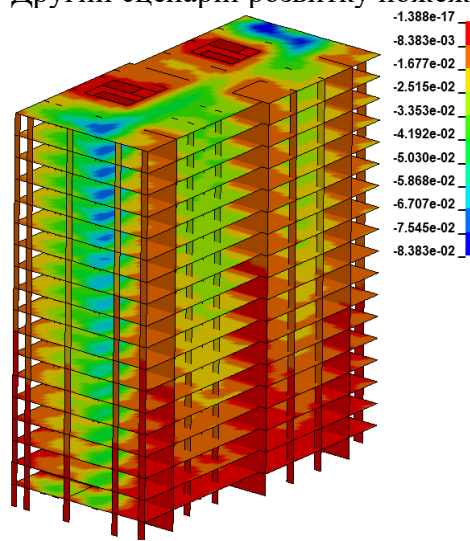
Дослідження можливості настання прогресуючого обвалення будівлі з елементами зі зниженими механічними характеристиками внаслідок теплової дії пожежі в приміщеннях згідно зі встановленими сценаріями пожежі показало, що у всіх випадках прогресуюче обвалення також не відбувається. Вертикальні переміщення будівлі для випадків, коли пожежа розвивається згідно зі встановленими сценаріями пожежі протягом 150 хв, наведені на рис. 12.

Незважаючи на досить значні переміщення в розглянутих варіантах осередків пожежі за звичайних умов – від 60 до 120 мм (для 1-3 і 5 сценаріїв), такі значення переміщень виникають лише на одному поверсі в зоні осередку пожежі і не розповсюджуються по висоті на інші яруси. У сценарії 4 переміщення (25 мм) навіть не досягають граничних за II групою граничних станів. Схема будівлі також не є геометрично змінюваною.

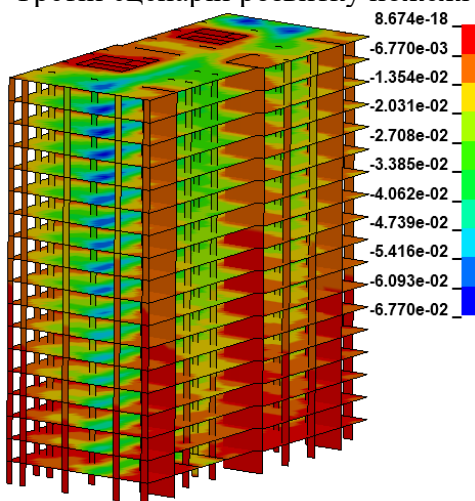
Перший сценарій розвитку пожежі



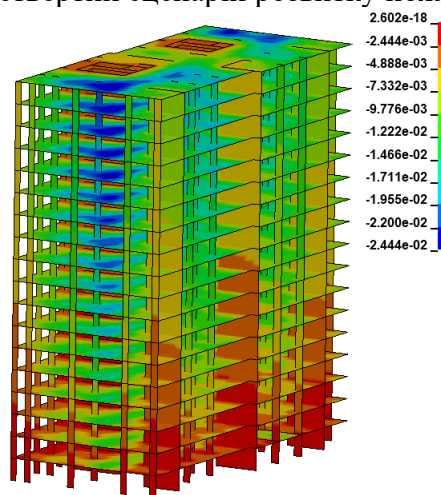
Другий сценарій розвитку пожежі



Третій сценарій розвитку пожежі



Четвертий сценарій розвитку пожежі



П'ятий сценарій розвитку пожежі

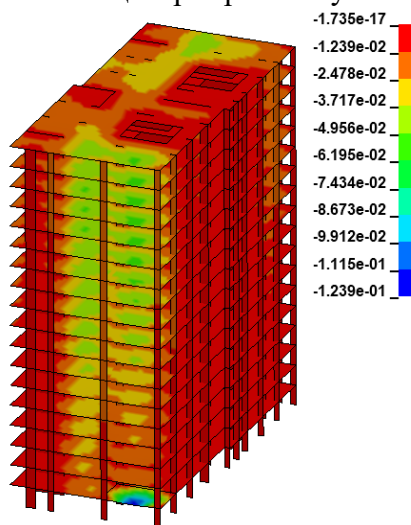


Рис. 12. Розподіл вертикальних переміщень (м) у конструктивній системі при впливі діючих механічних навантажень від різних сценаріїв пожежі

Для вивчення характеру прогресуючого обвалення за умови дії статичного рівномірно розподіленого навантаження, що призводить до обвалення частини колон, був виконаний розрахунок. Визначено, що мінімальне навантаження, при якому з'являються ознаки прогресуючого обвалення, становить 16.4 кН/м^2 . На рис. 13 показані деформаційні схеми конструктивної системи будівлі при ініціації прогресуючого обвалення при різних сценаріях пожежі у приміщеннях будівлі.

Наведені СЕ моделі будівлі при формуванні ознак прогресуючого обвалення для різних сценаріїв розвитку пожежі дають змогу помітити деякі особливості поведінки конструктивної системи в таких умовах. У всіх випадках п'яти сценаріїв пожежі прогресуюче обвалення охоплює частини та елементи конструктивної системи будівлі, що виходять за межі приміщення, а також елементи, фізико-механічні характеристики яких не піддані зниженню внаслідок пожежі. Максимальні значення переміщень склали від 1600 до 3200 мм.

Руйнування елементів відбувається каскадно з найбільш ослаблених, перекидаючись на елементи, що сприймають більше навантаження. Елементи, які не мають знижених механічних характеристик, руйнуються внаслідок збільшення внутрішніх зусиль. Підвищення зусиль у цих елементах обґрунтовується тим, що при зменшенні жорсткості елементів, підданих дії підвищених навантажень, елементи більшої жорсткості сприймають більше навантаження. Так, у сусідніх з нагрітими колонами повздовжнє зусилля виросло на 35 %, а саме обвалення стало можливим лише за умови підвищення корисного навантаження у 3.72 рази. У такому випадку схема стає геометрично змінюваною.

Також важливим висновком, що можна зробити після аналізу механізму прогресуючого обвалення будівлі внаслідок пожежі, є те, що за умов використання рекомендованого настановами [1, 3] впливу пожежі у вигляді стандартної температурної кривої є невідворотним виникнення прогресуючого обвалення. Це зумовлено,

по-перше, відсутністю спадної гілки у стандартному температурному режиму пожежі; по-друге, поширенням пожежі в сусідні приміщення в межах поверху та на суміжні поверхи через перекриття і, як наслідок, необхідністю враховувати зниження фізико-механічних характеристик матеріалів конструкцій у результаті теплового впливу в цих приміщеннях.

Висновки. З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

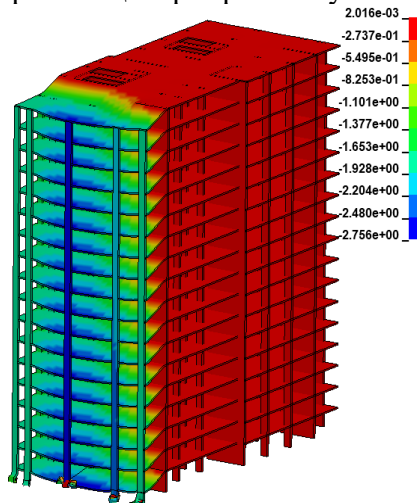
- запропоновано метод та обґрунтовано методику моделювання прогресуючого обвалення каркасних монолітних будинків на базі проведення явного динамічного аналізу багатоповислої каркасної залізобетонної безтигельної будівлі при пожежі за стандартним режимом (150 хв – I ступінь вогнестійкості), який передбачає врахування нелінійних процесів зміни фізико-механічних характеристик і зміни температури. На відміну від попередніх результатів [11], де розглянуто обговорювану будівлю з ідентичним розташуванням осередків пожежі, у роботі врахована зміна характеристик у часі та нелінійні характеристики матеріалів, а перерізи несучих конструкцій змодельовані шарами, яким можна призначати окремі значення характеристик відповідно до розподілення температур за товщиною перерізу. Усе це дає змогу отримати більш коректні значення компонентів НДС конструкцій, що розглядаються;

- за результатами розрахунку як ознаку настання прогресуючого обвалення прийнято швидке збільшення переміщень, що розповсюджуються як у плані, так і за висотою будівлі, причому ці переміщення переважають на декілька порядків переміщення, отримані на звичайних (неаварійних) умовах. Але слід зазначити, що поява ознак прогресуючого обвалення стала можливою лише при підвищенні корисного навантаження у 3.72 рази. Разом з цим можна спостерігати перерозподіл зусиль у зв'язку зі зміною жорсткостей системи. Так, у сусідніх колонах, що не були піддані дії підвищених температур, повздовжні зусилля зросли на 35 %.

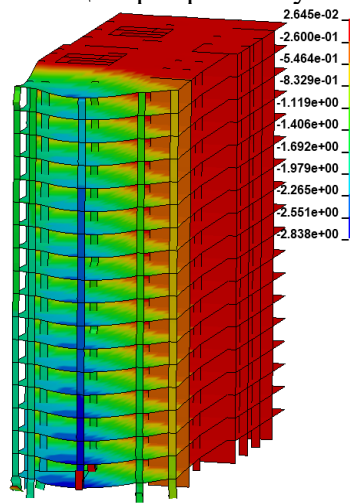
У подальшому інтерес має співставлення цього методу з енергетичним

підходом [12] визначення настання прогресуючого обвалення.

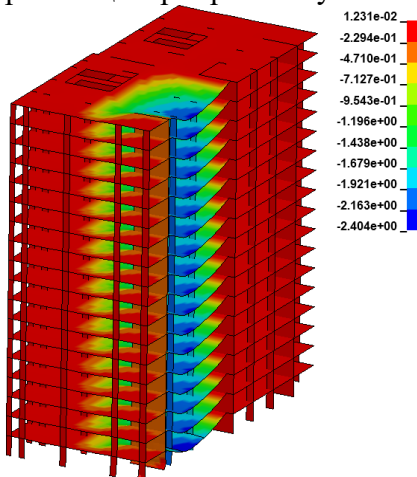
Перший сценарій розвитку пожежі



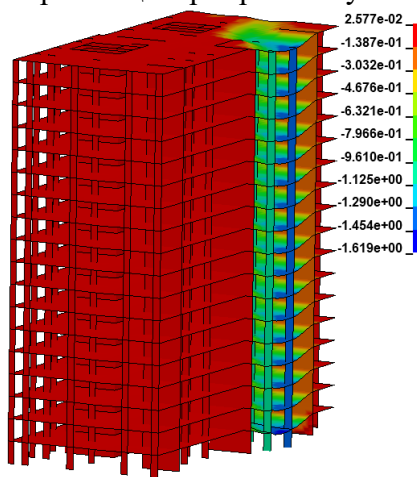
Другий сценарій розвитку пожежі



Третій сценарій розвитку пожежі



Четвертий сценарій розвитку пожежі



П'ятий сценарій розвитку пожежі

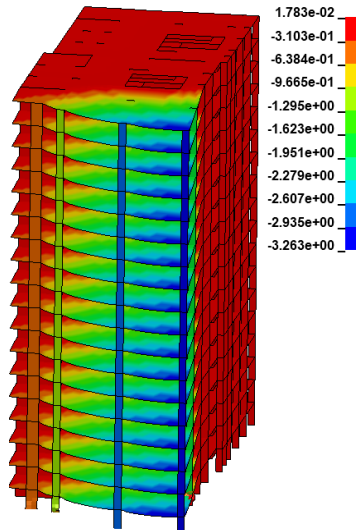


Рис. 13. Розподіл вертикальних переміщень (м) у конструктивній системі при настанні прогресуючого обвалення при розглянутих сценаріях пожежі

Список використаних джерел

1. ДБН В.1.1.7-2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Чинний від 01.03.2017. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-88> (дата звернення: 25.09.2023).
2. ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT). Чинний від 01.07.2013. URL: <https://uscc.ua/ru/dstu-n-en-1991-1-22010-en-1991-1-22002-idt-evrokod-1-dii-na-konstrukcii-castina-1-2-zagalni-dii-dii-na-konstrukcii-pid-cas-pozezi> (дата звернення: 25.09.2023).
3. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). Чинний від 01.07.2013. URL: https://dnaop.com/html/62872/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-%D0%9D_%D0%91_EN_1992-1-2_2012 (дата звернення: 25.09.2023).
4. Jian Jiang, Guo-Qiang Li. Progressive collapse analysis of 3D steel frames with concrete slabs exposed to localized fire. *Engineering Structures*. Vol. 149. 2017. P. 21-34. ISSN 0141-0296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.041>.
5. Kirby B. R. British steel technical European fire test program design, construction and results. In: Fire, static and dynamic tests of building structures. London, 1997.
6. Yun Zhou, Taiping Chen, Yilin Pei, Hyeon-Jong Hwang, Xiang Hu, Weijian Yi, Lu Deng, Static load test on progressive collapse resistance of fully assembled precast concrete frame structure. *Engineering Structures*. Vol. 200. 2019. 109719. ISSN 0141-0296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109719> (last access: 25.09.2029).
7. Narayanaswamy P., Srinivasan S. K. & Murugan P. Developments and research on fire-induced progressive collapse behaviour of reinforced concrete elements and frame — a review. *Environ Sci Pollut Res* 30, 72101–72113 (2023). URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22336-x> (last access: 25.09.2029).
8. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Чинний від 01.01.2007. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-753> (дата звернення: 25.09.2023).
9. Поздеев С. В. Развитие научных основ определения пределов огнестойкости несущих железобетонных конструкций: дисс. ... д-ра техн. наук : 21.06.02. Черкассы, 2012. 360 с.
10. Jian Jiang, Joseph A. Main, Jonathan M. Weigand, and Fahim Sadek. Reduced-Order Modeling of Composite Floor Slabs in Fire. II: Thermal-Structural Analysis. *Journal of Structural Engineering*. 146(6):0402008.
11. Шмуклер В. С., Резнік П. А., Альмохамад М. Про одну можливість оцінювання прогресуючого обвалення конструкцій при пожежі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 194. С. 37-48. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217291> (дата звернення: 25.09.2023).
12. Шмуклер В. С. Про один підхід формування технології проектування раціональних конструкцій. *Вісник ХНАДУ*. 2022. № 98. С. 98-113. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2022.98.0.93> (дата звернення: 25.09.2023).

Мохамад Альмохамад, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3715-7437. E-mail: engipr@gmail.com.

Mohamad Almohamad, postgraduate student, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-3715-7437. E-mail: engipr@gmail.com.

Статтю прийнято 28.09.2023 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 621.833:629.423.2

ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ПРОЄКТУВАННЯ І ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО РЕСУРСУ ТЯГОВИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Д-р техн. наук В. І. Мороз, кандидати техн. наук В. І. Громов, О. А. Логвіненко

SPECIAL FEATURES OF OPTIMIZATION DESIGN AND EVALUATION OF TECHNICAL RESOURCE FOR TRACTION GEAR TRANSMISSIONS OF RAILWAY ROLLING STOCK

Dr. Sc. (Tech.) V. I. Moroz, PhD (Tech.) V. I. Hromov, PhD (Tech.) O. A. Lohvinenko

Анотація. У статті висвітлено особливості оптимізаційного проєктування тягових зубчастих передач рухомого складу залізниць, спрямованого на визначення основних конструктивних параметрів відповідних парних шестерень і зубчастих коліс, при використанні яких досягається збільшення їхнього технічного ресурсу. Наведено рекомендації з формалізованого описання таких досліджень у вигляді відповідних задач багатомірної оптимізації з обмеженнями. Подано результати з оцінювання впливу конструктивних параметрів шестерень і зубчастих коліс тягових зубчастих передач різних серій тепловозів і електропоїздів на їхній технічний ресурс.

Ключові слова: зубчасте колесо, оптимізаційне проєктування, технічний ресурс, тягова зубчаста передача, шестерня.

Abstract. The article highlights the peculiarities of optimization design for traction gear transmissions of railway rolling stock, aimed at determining the main structural parameters of corresponding paired gears and toothed wheels to increase their technical resource. The recommendations provide a formalized description of such investigations in the form of multidimensional optimization problems with constraints. Significant attention is given to the selection peculiarities of main variable parameters, primary criteria (related to reducing wear on tooth contact surfaces), and secondary numerical criteria (corresponding to functional constraints). The displacement coefficients of the gear and toothed wheel are considered as the main variable parameters, with a decisive impact on engagement parameters and characteristics. The main criterion, taking into account the focus on increasing the technical resource, is the minimization of the difference between the maximum coefficients of specific sliding on the feet of the lateral profiles of contacting teeth. Numerical functional constraints correspond to general design conditions for manufacturing and meshing of gear elements. The article elucidates the peculiarities of searching for optimal solutions using available generalized mathematical models that describe changes in the main criterion and existing functional constraints based on selected main variable parameters. It is also recommended to use constructed blocking contours based on these models to define the region of admissible solutions and find the corresponding optimization solution. For each variant of structural parameters of the paired gear and toothed wheel found during optimization design, the article suggests evaluating the respective changes in the technical resource according to the

provided recommendations. The article presents the results of a comprehensive study of traction gear transmissions in various series of locomotives and electric trains, including assessments of increased technical resource achieved by using paired gears and toothed wheels with specified design parameters obtained through optimization design.

Keywords: gear wheel, optimization design, pinion, technical resource, traction gear transmission.

Вступ. У сучасних умовах особливого значення набуває надійне функціонування вітчизняних залізниць, здійснення необхідних вантажних і пасажирських перевезень. За оцінками фахівців [1], це потребує негайного проведення відповідних науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, спрямованих на забезпечення працездатності, надійності, збільшення технічного ресурсу (ТР) основних модулів конструкції тягового і моторвагонного рухомого складу (ТРС і МВРС). До таких модулів належать тягові приводи, у конструкції яких використовуються тягові зубчасті передачі (тягові редуктори) (ТЗП) [2, 3]. Тому одним з актуальних напрямів досліджень є збільшення ТР тягових зубчастих передач сучасного ТРС і МВРС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За результатами проведених в Українському державному університеті залізничного транспорту комплексних розрахунково-експериментальних досліджень з підвищення надійності ТЗП сучасного ТРС і МВРС встановлено, що одним з дієвих напрямів збільшення ТР є використання в їхньому складі шестерень (Ш) і зубчастих коліс (ЗК) з визначеними, при відповідному оптимізаційному проектуванні, конструктивними параметрами [4].

Разом із цим розповсюджені відомі [5-8] методи оптимізації проєктованих зубчастих передач (редукторів) не повною мірою враховують конструктивні особливості ТЗП. Переважно вони орієнтовані на виконання критеріальних умов забезпечення мінімальної маси, найменших габаритних розмірів, рівномірності зубців. Значна кількість

досліджень присвячена питанням діагностування технічного стану редукторів [3], а також математичному моделюванню можливих аварійних руйнувань зубців [9, 10]. До того ж при проєктуванні не висвітлюється вплив знайдених параметрів шестерень і зубчастих коліс на особливості побудови їхніх робочих профілів, умови контактування і зношування при нормальній експлуатації передач. Це визначає необхідність розгляду особливостей проведення оптимізаційного проєктування і оцінювання технічного ресурсу тягових зубчастих передач.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є висвітлення особливостей проведення оптимізаційного проєктування ТЗП, спрямованого на забезпечення їхнього технічного ресурсу. Критеріальною умовою проєктування (як задачі багатомірної оптимізації з обмеженнями) є пошук таких значень конструктивних параметрів Ш і ЗК, за яких досягається найбільший ТР. У загальній постановці це передбачає виконання таких завдань:

- обґрунтування вибору основних змінних – основних конструктивних параметрів Ш і ЗК, що мають визначальний вплив на інші параметри, умови контактування зубців, характеристики зацеплення та величини ТР;

- обґрунтування вибору основного (головного) і вторинних критеріїв (функціональних обмежень);

- обрання технології проведення оптимізаційного пошуку;

- висвітлення особливостей оцінювання технічного ресурсу ТЗП;

- проведення оптимізаційного проектування ТЗП з впровадженням запропонованих рішень для тепловозів серії М62 і елекропоїздів серії ЕР2Р.

Основна частина дослідження. Загалом потрібний ресурс ТЗП досягається за рахунок досконалості конструкції Ш та ЗК, що входять до її складу, і визначає необхідність проектування нових (або модернізованих) тягових зубчастих передач з оптимізованими конструктивними параметрами і характеристиками зацеплення, найкращими умовами взаємодії та механічного зношування контактуючих профілів (бокових поверхонь) зубців. Це може бути досягнуто за рахунок використання відповідного методу оптимізаційного проектування ТЗП. Для його формалізованого описання і проведення (як задачі умовної багатомірної оптимізації з обмеженнями) використовується відома процедура «згортання» векторного критерію – відповідна цільова функція описує зв'язок обраного головного критерію з обраними керованими змінними, а вторинні критерії ураховуються як відповідні функціональні обмеження.

За результатами проведених довгострокових досліджень з удосконалення конструкції прямозубих евольвентних тягових зубчастих передач [4] встановлено, що в умовах нормальної (безаварійної) експлуатації при заданих конструктивних параметрах ТЗП як складової тягового привода (модуль зубців m , передаточне відношення u_{12} , кількість зубців шестерні z_1 і колеса z_2 , міжцентрова відстань a_w) основний вплив на формування надійності і довговічності мають параметри і характеристики зацеплення зубців, особливості геометрії робочих профілів та умови їхнього зношування (прояви тертя в зонах ковзання при контакті). При цьому дієвим важелем для удосконалення характеристик зацеплення є відповідні зміни розрахункових коефіцієнтів зміщення

шестерні x_1 і зубчастого колеса x_2 . Тому їх доцільно обирати як основні змінні (при оптимізаційному проектуванні Ш і ЗК).

Обрані коефіцієнти x_1 та x_2 мають суттєвий вплив на значення важливих конструктивних параметрів і показників зацеплення: міжцентрову відстань a_w , загострення зубців шестерні S_{a1} і колеса S_{a2} , можливість інтерференції з боку зубців Ш і ЗК, підрізання зубців при виготовленні, коефіцієнт торцевого перекриття ε_α , коефіцієнти питомих ковзань профілів зубців шестерні λ_1 та колеса λ_2 та ін. Серед них на особливу увагу заслуговує можливість за рахунок зміни коефіцієнтів x_1 та x_2 впливати на умови (інтенсивність) механічного зношування (умови ковзання) активних профілів зубців Ш і ЗК. Це співпадає з напрямом критеріального оцінювання оптимізаційного проектування ТЗП, передбачає цільове вирівнювання (в ідеалі збіг) максимальних коефіцієнтів ковзання на ніжках зубців λ_{1max} і λ_{2max} . Тому як відповідний головний критерій при оптимізаційному проектуванні доцільно обрати різницю між цими значеннями $\Delta\lambda = |\lambda_{1max}| - |\lambda_{2max}|$.

Наведені вище інші показники (у ранзі вторинних критеріїв) розглядаються як функціональні обмеження φ_i і в сукупності формують область допустимих рішень D_x для оптимізаційного пошуку найкращих (за головним критерієм $\Delta\lambda(x_1, x_2)$) значень коефіцієнтів x_1^* і x_2^* . До основних з них належать:

- φ_1 – вимога забезпечення заданої міжосьової відстані та радіального зазора ($a_w/m, c/m = 0,25$);
- φ_2, φ_3 – відсутність загострення вершин зубців Ш і ЗК ($S_{a1,2}/m \geq 0,25$);

- φ_4 – забезпечення безперервного зачеплення з найбільш можливим коефіцієнтом перекриття ($\varepsilon_\alpha \geq 1,2$);
- φ_5, φ_6 – відсутність інтерференції з боку Ш або ЗК ($\rho_{1,2} \leq \rho_{int}$);
- φ_7 – відсутність підрізання ніжок зубців шестерні при виготовленні інструментальною рейкою ($x_1 \geq 1 - 0,0585 \cdot z_1$).

З урахуванням розглянутого задача відповідного оптимізаційного проектування може бути подана як

$$\Delta\lambda(x_1, x_2) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$x_1, x_2 \in D_x.$$

Слід зазначити, що в теоретичному плані при обраних головному критерії і функціональних обмеженнях така задача може бути подана як мінімізація узагальненої функції оптимізації Φ , що пов'язує цільову функцію за головним критерієм $\Delta\lambda(x_1, x_2)$ і функціональні обмеження φ_i (формулюються і досліджуються на основі відомих чисельних методів оптимізації). Але при цьому суттєво ускладнюється технологія пошуку оптимальних рішень внаслідок необхідності виконання великої кількості покрокових обчислень конструктивних параметрів і характеристик зачеплення Ш та ЗК з різними коефіцієнтами x_1 і x_2 .

Тому для пошуку оптимізованих значень коефіцієнтів x_1^* і x_2^* доцільно використовувати розроблену в Українському державному університеті залізничного транспорту відповідну до формули (1) технологію [11], що передбачає використання отриманих узагальнених математичних моделей (УММ) для описання змін значень головного критерію і функціональних обмежень залежно від коефіцієнтів x_1 і x_2 . За їхньою допомогою отримують

відповідні ізолінії для $\Delta\lambda$ і φ_i (лінії, відповідні їхнім фіксованим значенням, що задаються) в області розглядуваних інтервалів варіювання змінних x_1 ($x_{1min} \leq x_1 \leq x_{1max}$) і x_2 ($x_{2min} \leq x_2 \leq x_{2max}$). При цьому ізолінії функціональних обмежень $\varphi_2 \dots \varphi_7$ визначають область D_x , у якій знаходяться ізолінії головного критерію $\Delta\lambda$ ($\Delta\lambda = 0$) і функціонального обмеження φ_1 ($a_w = a_w / m$). Координати точки їхнього перетину відповідають значенням коефіцієнтів x_1^* і x_2^* .

Узагальнена графічна інтерпретація цієї технології показана на рис. 1.

Слід зазначити, що при практичному використанні такої технології для досліджуваних ТЗП передбачається побудова відповідних, аналогічних до рис. 1, комплексних графіків (блокувальних контурів), що, окрім розглянутих, додатково містять ізолінії з різними значеннями контрольованих показників зачеплення, міцності, технологічності [11]. Це забезпечує необхідну інформативність для оперативного прийняття відповідних рішень.

Як видно, використання наведеної технології в дослідженнях різних ТЗП передбачає отримання значної кількості відповідних ізоліній для $\Delta\lambda$ і функціональних обмежень φ_i . Для цього на першому етапі досліджень для кожної з розглядуваних ТЗП були отримані УММ вигляду $\Delta\lambda(x_1, x_2)$ і $\varphi_i(x_1, x_2)$. Але вони були орієнтовані на конкретну ТЗП і потребували додаткового використання процедури визначення відповідних ізоліній. Тому для забезпечення універсальності математичних описань у дослідженнях ТЗП і спрощення побудови відповідних ізоліній (фіксовані параметри кожної ТЗП визначаються при заданих кількості зубців шестерні z_1 і передаточному відношенні

передачі u_{12}) із використанням методів математичного планування експерименту були отримані УММ вигляду $x_1 = f(x_2, z_1, u_{12})$ для $\Delta\lambda$ і всіх розглядуваних φ_i . Як приклад нижче

наведено УММ для отримання ізоліній $\Delta\lambda$ ($\Delta\lambda = 0$) і заданих функціональних обмежень φ_1 (задана a_w/m) і φ_4 ($\varepsilon_\alpha = 1,2$).

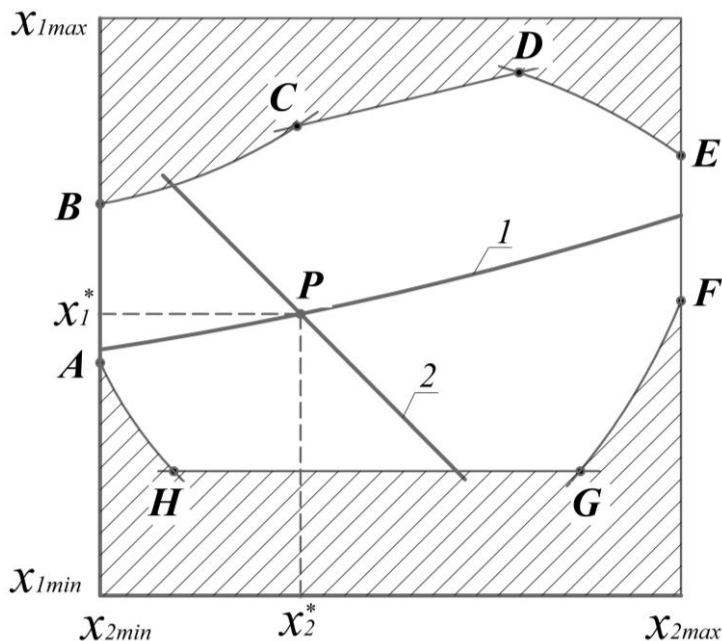


Рис. 1. Узагальнена графічна інтерпретація технології оптимізаційного пошуку:
AHGFEDCB – область допустимих рішень D_x ; **1** – ізолінія $\Delta\lambda = 0$;
2 – ізолінія φ_1 (заданої a_w/m); **P** – шукана точка з координатами x_1^* і x_2^* ;
AH, GF, DC – ізолінії заданих функціональних обмежень φ_5, φ_6 ;
DC – обмеження φ_4 ; **CB** – обмеження φ_2 ; **HF** – обмеження φ_7

Для ізолінії $\Delta\lambda$

$$x_1 = 0,792 + 0,297 \cdot x_2 - 0,0253 \cdot z_1 - 0,012 \cdot u_{12} + 0,0315 \cdot x_2^2 + 0,00033 \cdot z_1^2 + 0,00317 \cdot u_{12}^2 + 0,004 \cdot x_2 \cdot z_1 - 0,0536 \cdot x_2 \cdot u_{12} - 0,00025 \cdot z_1 \cdot u_{12}. \quad (2)$$

Для ізолінії a_w/m

$$-0,0599 \cdot x_\Sigma^2 + x_\Sigma \cdot (0,922 + 0,00219 \cdot z_1 + 0,00868 \cdot u_{12}) + 0,507 \cdot z_1 + 0,029 \cdot u_{12} - 0,0001 \cdot z_1^2 - 0,002 \cdot u_{12}^2 + 0,5 \cdot z_1 \cdot u_{12} - 0,151 - a_w/m = 0. \quad (3)$$

Для ізолінії $\varepsilon_\alpha = 1,2$

$$x_1 = -0,471 - 0,649 \cdot x_2 + 0,0924 \cdot z_1 + 0,187 \cdot u_{12} - 0,104 \cdot x_2^2 - 0,00097 \cdot z_1^2 - 0,0132 \cdot u_{12}^2 + 0,0101 \cdot x_2 \cdot z_1 + 0,0654 \cdot x_2 \cdot u_{12} - 0,00252 \cdot z_1 \cdot u_{12}. \quad (4)$$

Такі УММ, а також особливості їхнього дослідження розглянуті в роботі [11]. Використання цих УММ забезпечує раціональну побудову всіх (не тільки розглянутих, а й, наприклад, для показників міцності) необхідних ізоліній для кожної з досліджуваних ТЗП.

Знайдені при оптимізаційному проектуванні значення коефіцієнтів x_1^* і x_2^* використовуються при проведенні всіх необхідних розрахунків [5-8] з визначення оптимізованих конструктивних параметрів Ш і ЗК, координат бокових поверхонь зубців, моделювання відповідних характеристик і параметрів їхнього зачеплення. Вони необхідні для оцінювання величини очікуваного технічного ресурсу. При цьому при його визначенні виникає додаткова складність, пов'язана з необхідністю обрання і використання конструктивного параметра для оцінювання зміни бокових профілів зубців Ш і ЗК від початкового до граничного стану.

З урахуванням рекомендацій [12] як такий універсальний показник доцільно використовувати величини постійних хорд зубців шестерні (S_{n1}) і колеса (S_{n2}). Саме поняття «постійна хорда» пов'язане з виготовленням зубчастих коліс з використанням інструментальної зуборізної рейки (рис. 2). Величина S_n визначається відстанню між точками дотику профілів зубців і бокових сторін рейки. При цьому величини S_n для зубчастих коліс з однаковими модулем m і коефіцієнтом зміщення рейки при виготовленні x зберігаються постійними. Розрахунки величин постійних хорд Ш і ЗК виконуються за формулою

$$S_{n1,2} = (0,5\pi \cdot \cos^2 \alpha + x_{1,2} \cdot \sin 2\alpha) \cdot m, \quad (5)$$

де α – кут профілю вихідного контуру рейки.

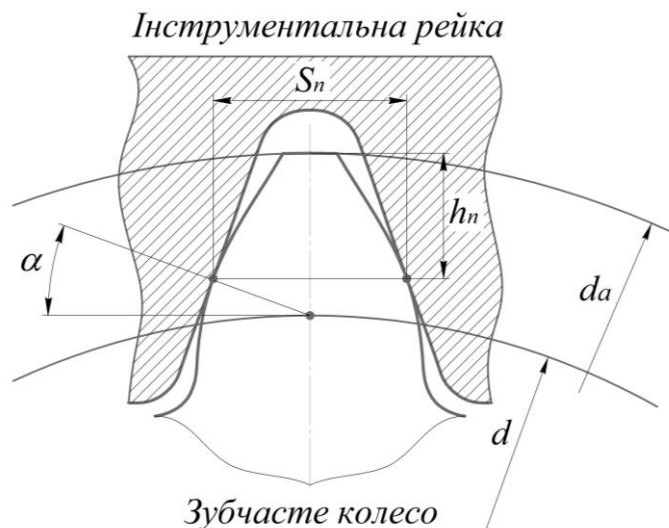


Рис. 2. Схема до визначення постійної хорди:

S_n – постійна хорда зубця; h_n – відстань до постійної хорди від кола вершин;
 α – кут профілю вихідного контуру; d_a – діаметр кола вершин; d – ділильний діаметр

Про доцільність використання розгляданого показника в розрахунках технічного ресурсу ТЗП свідчить його універсальність. На відміну від інших можливих (наприклад величина хорди за ділильним колом), для нього встановлені [12] значення найбільших за граничним станом зносів Δ_{nmax} (різниця величин постійних хорд зубців нового і гранично зношеного колеса). Для шестерні $\Delta_{n1max} = 2,5\text{мм}$ і зубчастого колеса

$\Delta_{n2max} = 3,0\text{мм}$. Це має важливе значення для проведення розрахунків ТР.

Для оцінювання технічного ресурсу ТЗП з визначеними при оптимізаційному проектуванні конструктивними параметрами як показники ТР розглядаються напрацювання шестерні і зубчастого колеса у вигляді відповідних пробігів локомотива (або моторної секції електропоїзда) L_1 і L_2 від початку експлуатації до виникнення граничних зносів Δ_{n1max} і Δ_{n2max} [4]:

$$L_1 = \frac{\Delta_{n1max} \cdot f(HRC_1)}{n_{\delta 2} \cdot u_{12} \cdot f(h_m) \cdot f_1(A) \cdot f(\Delta_{n1max})}, \quad (6)$$

$$L_2 = \frac{\Delta_{n2max} \cdot f(HRC_2)}{n_{\delta 2} \cdot f(h_m) \cdot f_2(A) \cdot f(\Delta_{n2max})}, \quad (7)$$

де $n_{\delta 2}$ – кількість взаємодій зубців колеса з зубцями шестерні за один оберт колісної пари;

u_{12} – передаточне число ТЗП;

$f(HRC_{1,2})$, $f(\Delta_{n1,2max})$, $f(h_m)$, $f(A)$ – функції, що враховують залежність інтенсивності зносу зубців шестерні та колеса відповідно від початкової твердості робочих поверхонь зубчастих коліс, зростання динамічних навантажень при збільшенні зносів зубців, товщини шару мастила, характеристик абразивних домішок (часток).

Аналіз формул (6) і (7) показав, що оптимізовані за коефіцієнтами x_1^* і x_2^* конструктивні параметри (відповідні показники зачеплення і особливості геометрії контактуючих поверхонь зубців Ш і ЗК) мають вплив на складові $f_{1,2}(\Delta_{n1,2max})$ і $f_{1,2}(h_m)$. Тому для розрахування їх використовуються відповідні математичні моделі, у яких ураховуються знайдені при оптимізаційному проектуванні коефіцієнти динамічної навантаженості в зачепленні, нерівномірності її розподілу за довжиною контактної

лінії, відповідні діючі сили, швидкості кочення та ковзання в розрахунковій точці контакту зубців, приведені радіуси кривизни в цій точці та ін.

З урахуванням розглянутих у статті особливостей і наведених рекомендацій було проведено оптимізаційне проектування тягової зубчастої передачі (на можливість заміни експлуатованих серійних ТЗП) магістральних вантажних тепловозів серії М62 [2]. Початкові дані для проектування (відповідність ТЗП тепловозів М62, що знаходяться в експлуатації) подані в табл. 1.

При проведенні оптимізаційного проектування відповідно до формули (1) були обрані основні змінні, головний критерій і функціональні обмеження. Побудовано (аналогічно рис. 1) відповідний блокувальний контур (розгорнуто поданий у роботі [11]), який підтвердив, що основні конструктивні показники Ш і ЗК серійної ТЗП відповідають (при заданих m , u_{12} , z_1 , z_2) коефіцієнтам $x_1 = 0,8$ і $x_2 = 0,24$, але точка K з такими

координатами знаходиться на ізолінії $a_w / m = 46,88$ значно вище ізолінії $\Delta\lambda = 0$. Це обґрунтовує доцільність обрання коефіцієнтів x_1^* і x_2^* за положенням точки перетину цих ізоліній – точки P ($x_1^* = 0,57$ і $x_2^* = 0,654$).

У межах дослідження були проведені розрахунки всіх конструктивних параметрів Ш і ЗК за двома варіантами – варіант 1 ($x_1 = 0,8$, $x_2 = 0,424$), варіант 2 ($x_1^* = 0,57$, $x_2^* = 0,654$). Отримані результати наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Основні параметри ТЗП тепловозів М62

Параметр ТЗП (модуль конструкції тепловоза)	М62 (2ТЕ10Л)
1	2
Модуль зубців m , мм	10
Передаточне число u_{12}	4,53
Кількість зубців шестерні z_1	15
Кількість зубців колеса z_2	68
Коефіцієнт зміщення шестерні x_1	0,8
Коефіцієнт зміщення колеса x_2	0,424
Міжцентрова відстань (централь) a_w , мм	468,802
Робоча ширина зубчастих коліс b_w , мм	140
Матеріал шестерні	сталь 20ХН3А
Матеріал вінця колеса	сталь 45ХН
Швидкість тепловоза на тривалому режимі v_{mp} , км/год	20
Сила тяги тепловоза для тривалого режиму F_{Kmp} , Н	196000

Таблиця 2

Результати розрахунку конструктивних параметрів ТЗП

Параметр (показник), позначення	Величина	
	Варіант 1	Варіант 2
1	2	3
Кут вихідного контуру α , град	20	20
Коефіцієнт радіального зазора c^*	0,25	0,25
Коефіцієнт висоти головки зубця h^*	1	1
Кут зачеплення α_w , град	23,79	23,79
Міжцентрова відстань a_w , мм	468,802	468,802
Ділильний діаметр кола шестерні d_l , мм	165	165
Основний діаметр шестерні d_{b1} , мм	155,05	155,05
Початковий діаметр шестерні d_{w1} , мм	169,45	169,45

Продовження табл. 2

1	2	3
Діаметр западин шестерні d_{f1} , мм	155,1	150,04
Діаметр вершин шестерні d_{a1} , мм	202,28	197,22
Ділильний діаметр колеса d_2 , мм	748	748
Основний діаметр колеса d_{b2} , мм	702,89	702,89
Діаметр початкового кола колеса d_{w2} , мм	768,16	768,16
Діаметр кола западин колеса d_{f2} , мм	729,83	734,88
Діаметр кола вершин колеса d_{a2} , мм	777,01	782,06
Ділильний крок p , мм	34,558	34,558
Постійна хорда шестерні S_{n1} , мм	20,91	19,29
Висота (від вершин) до постійної хорди шестерні h_{n1} , мм	14,83	12,6
Постійна хорда колеса S_{n2} , мм	18,26	19,88
Висота (від вершин) до постійної хорди колеса h_{n2} , мм	11,18	13,41
Різниця максимальних питомих ковзань на ніжках зубців шестерні та колеса $\Delta\lambda$	0,818	0,001
Товщина зубця шестерні на поверхні вершин S_{a1} , мм	3,635	5,4
Товщина зубця колеса на поверхні вершин S_{a2} , мм	9,08	8,65
Торцевий коефіцієнт перекриття ε_a	1,276	1,333

З табл. 2 видно, що у варіанті 2 з оптимізованими значеннями конструктивних параметрів при дотриманні всіх початкових умов на проектування ТЗП забезпечується значне поліпшення (порівняно з варіантом 1) характеристик зачеплення. Виконується умова зменшення інтенсивності зношування активних профілів зубців Ш і ЗК (досягається $\Delta\lambda = 0,001$), збільшується величина торцевого коефіцієнта перекриття,

позитивно змінюється геометрія робочих профілів зубців (у тому числі товщина зубців шестерні за колом вершин дорівнює $S_{a1} = 5,4$ мм).

З використанням наведених у табл. 2 значень серійних і оптимізованих конструктивних параметрів були виконані розрахунки з визначення відповідних показників міцності і очікуваних ресурсів Ш і ЗК досліджуваних ТЗП. Їхні основні результати подано в табл. 3.

Таблиця 3

Результати оцінювання показників технічного ресурсу ТЗП

Показник	ТЗП тепловоза М62	
	Серійний параметр	Оптимальний параметр
1	2	3
Допустимі напруження згину шестерні σ_{FP1} , МПа	385	385
Розрахункове напруження зубців шестерні при згині σ_{F1} , МПа	293	304

Продовження табл. 3

1	2	3
Допустимі напруження згину колеса σ_{FP2} , МПа	280	280
Розрахункове напруження зубців колеса при згині σ_{F2} , МПа	239	228
Допустимі контактні напруження ТЗП, що не викликають небезпечної контактної втомленості матеріалу σ_{HP} , МПа	935	935
Розрахункове контактне напруження в полюсі зачеплення ТЗП σ_H , МПа	866	855
Очікуваний пробіг шестерні до граничного зносу за постійною хордою L_1 , тис. км	440	520
Очікуваний пробіг колеса до граничного зносу за постійною хордою L_2 , тис. км	740	890

Аналіз отриманих результатів показав, що за рахунок використання Ш і ЗК з оптимізованими конструктивними параметрами при виконанні всіх умов на проектування може бути досягнуто суттєве (до 20 %) збільшення технічного ресурсу шестерні і зубчастого колеса ТЗП тепловозів серії М62.

Висновки. Обґрунтований вибір основних конструктивних параметрів Ш і ЗК, головного критерію та функціональних обмежень, а також обрана технологія проведення оптимізаційного дослідження дали змогу здійснити пошук таких значень конструктивних параметрів Ш і ЗК, за яких досягається найбільший ТР тягових зубчастих передач ТРС і МВРС.

Встановлено, що одним з дієвих напрямів підвищення технічного ресурсу ТЗП є використання відповідних шестерень і зубчастих коліс з визначеними при оптимізаційному проектуванні конструктивними параметрами.

З урахуванням визначального впливу коефіцієнтів зміщення при виготовленні шестерні x_1 і зубчастого колеса x_2 на координати бокових профілів зубців, показники і характеристики їхнього зачеплення, умови контактування та

інтенсивність зношування від стирання до головної задачі оптимізаційного проектування слід віднести визначення оптимізованих значень x_1^* і x_2^* за умовою (1) мінімізації величини $\Delta\lambda$ (різниці найбільших коефіцієнтів ковзання на ніжках зубців Ш і ЗК).

Важливою складовою оптимізаційного проектування тягових зубчастих передач є оцінювання впливу визначених при знайдених величинах x_1^* і x_2^* конструктивних параметрів на формування технічного ресурсу ТЗП. При цьому як контрольовані конструктивні параметри, за змінами яких оцінюються рівні зношування, доцільно розглядати величини постійних хорд зубців Ш і ЗК (визначаються за формулою (6)). Тоді як показники технічного ресурсу можуть розглядатися напрацювання (від початку експлуатації до виникнення граничних зносів) шестерні (L_1) і зубчастого колеса (L_2) у вигляді відповідних пробігів локомотива або моторної секції електропоїзда (визначаються за формулами (6) і (7)).

Подані в статті результати оптимізаційного проектування ТЗП для тепловозів серії М62 свідчать про

доцільність використання запропонованих рішень і наведених рекомендацій у дослідженнях, спрямованих на збільшення

технічного ресурсу ТЗП сучасного ТРС і МВРС [4].

Список використаних джерел

1. Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Еволюція транспорту та сучасна проблема української залізниці. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2022. Вип. 199. С. 89-98. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258816>.
2. Боднар Б. Є., Нечаєв Є. Г., Бобир Д. В. Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування: підруч. для ВНЗ залізнич. трансп. Дніпропетровськ: Ліра ЛТД, 2010. 358 с.
3. Михалків С. В., Бульба В. І., Ходаківський А. М. Виділення бічних смуг на спектрах потужності вібрації тягових редукторів електропоїздів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 179. С. 26-39. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.179.2018.147711>.
4. Мороз В. І., Громов В. І., Логвіненко О. А. Україна, Харків. Збільшення технічного ресурсу тягових зубчатих передач рухомого складу залізниць. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXXI Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2023, 17-20 травня 2023 р.* Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 242.
5. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин. Київ: Видавництво «Наукова думка», 2002. 660 с.
6. Курмаз Л. В. Основи конструювання деталей машин: навч. посіб. Харків: Видавництво «Підручник НТУ ХПІ», 2010. 532 с.
7. Деталі машин. Розрахунок та конструювання: підручник / Г. В. Архангельський, М. С. Воробйов, В. С. Гапонов та ін. Київ: Талком, 2014. 684 с.
8. Гайдамака А. В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навч. посіб. для студ. машинобуд. спец. усіх форм навч. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 275 с.
9. Omar D. Mohammed, Matti Rantatalo. Gear fault models and dynamics-based modelling for gear fault detection. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 117. 2020. P. 114-134. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104798>.
10. Hui Ma, Jin Zeng, Ranjiao Feng, Xu Pang Wen. Review on dynamics of cracked gear systems *Engineering Failure Analysis*. Vol. 55. 2015. P. 224-245. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.06.004>.
11. Мороз В. І., Братченко О. В., Громов В. І. Особливості вибору коефіцієнтів зміщення шестерні та колеса при оптимізаційному проектуванні тягових зубчастих передач. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків: НТУ(ХПІ), 2018. № 25 (1301). С. 107-110.
12. Братченко О. В., Громов В. І. Особливості експериментального визначення ступенів зносу тягових зубчастих передач моторвагонного рухомого складу. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. Серія «Технічні науки». Київ, 2018. Т. 29 (68). № 2. С. 295-298.

Мороз Володимир Ілліч, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри механіки і проектування машин, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0003-2497-3053. Тел.: +380577301051. E-mail: morozvi1294@gmail.com.

Громов Володимир Ігорович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: gromovv038@gmail.com.

Логвіненко Олександр Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри механіки і проектування машин, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0002-5731-7995. E-mail: logvinenko.mpm@gmail.com.

Moroz Volodymyr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Mechanics and Machine Design, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0003-2497-3053.

Tel.: +380577301051. E-mail: morozvi1294@gmail.com.

Hromov Volodymyr, Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer, Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: gromovv038@gmail.com.

Lohvinenko Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanics and Machine Design, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-5731-7995.

E-mail: logvinenko.mpm@gmail.com.

Статтю прийнято 11.09.2023 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

UDC 656.223:502.5

MODELING THE RAILWAY AND AUTOMOBILE SUPPLY CHAIN ON THE BASIS OF «GREEN» LOGISTICS

Dr. Sc. (Tech.) D. Lomotko, Dr. Sc. (Tech.) O. Ogar, postgraduate student M. Lomotko, postgraduate student O. Afanasova

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНО-АВТОМОБІЛЬНОГО ЛАНЦЮГА ПОСТАЧАННЯ ВАНТАЖІВ НА ОСНОВІ «ЗЕЛЕНОЇ» ЛОГІСТИКИ

Доктори техн. наук Д. В. Ломотько, О. М. Огар, аспіранти М. Д. Ломотько, О. Ф. Афанасова

Abstract. *Considering the prospects for the formation of a supply chain of goods based on the application of the concept of «green» logistics in multimodal transportation of goods with the participation of railway transport.*

Studies have found that the introduction of green multimodal technologies is possible by reducing the share of road transport over a distance of 300 km or more. Proposing the direction of savings from environmental taxes on investments in logistics infrastructure. Under these conditions, proposing an economic and mathematical model of a two-stage transport problem of integer programming with fuzzy criteria for optimizing the distribution of container flows between suppliers and consumers, taking into account the environmental criterion.

Keywords: *railway, road transport, supply chain, «green» logistics, multimodal transportation, environmental impact, carbon air pollution.*

Анотація. *Розглянуто перспективи формування ланцюга постачання вантажів на основі застосування концепції «зеленої» логістики при мультимодальних перевезеннях вантажів за участю залізничного транспорту. Доведено, що мультимодальні технології порівняно з доставкою вантажу одним видом транспорту мають менший негативний вплив на навколишнє середовище та повітря. Розглянуто традиційний підхід до визначення екологічного критерію на основі розрахування ряду окремих показників.*

Дослідженнями встановлено, що впровадження «зелених» мультимодальних технологій можливе за рахунок зменшення частки автомобільних перевезень на відстань 300 км і більше. Запропоновано спрямування економії від екологічних податків на інвестиції в логістичну інфраструктуру. За наведених умов запропоновано економіко-математичну модель двоетапної транспортної задачі цілочисельного програмування з нечіткими критеріями оптимізації розподілу контейнеропотоків між постачальниками та споживачами з урахуванням екологічного критерію. Формування значення екологічного критерію здійснюється за допомогою логіко-лінгвістичних методів опису систем у термінах лінгвістичних змінних і розглядається як сукупність лінгвістичних висловлень. Нечітка база знань, що відображує функціональний взаємозв'язок вхідних і вихідних нечітких змінних, є основою побудови узагальненого нечіткого відношення, заданого на універсальній множині для вхідних і вихідних змінних. Нечіткий висновок значення

екологічного критерію здійснюється в чотири етапи: фазифікація, безпосередній нечіткій висновок, акумуляція результатів, дефазифікація за методом «центра ваги». Побудовано функцію приналежності нечіткій множині. Оцінено значення нечіткого екологічного критерію при відстані перевезень 200 і 300 км. Встановлено, що розвиток мультимодальних перевезень в Україні потребує вирішення низки внутрішніх організаційно-правових питань, насамперед здійснення гармонізації національного транспортного законодавства з нормами ЄС.

Тарифи на перевезення контейнерів залізничним і автомобільним транспортом взято відповідно до даних відкритих джерел та апроксимовано за лінійною функцією.

Ключові слова: залізниця, автотранспорт, логістичний ланцюг, «зелена» логістика, мультимодальне перевезення, вплив на довкілля, вуглецеве забруднення повітря.

Introduction. Modern trends in freight traffic under the influence of martial law in Ukraine are determined by a decrease in the level and significant fluctuations in loading volumes, as well as significant queues towards interstate transitions. This means that the technology of transporting goods with the participation of railways must be updated using logistics principles. Any cargo owner carries out trade interaction with all open markets, therefore, efficient, fast and, if possible, cheap delivery of goods is a key factor in ensuring a carrier's stable profit. In particular, if in the past, due to the lack of a flexible approach to organizing the transportation of goods, the railway gradually lost traffic volumes and income from them, now «Ukrzaliznytsia» is the main domestic carrier, which should ensure the stability of the country's economy. In addition, the use of resource-saving transportation technology and environmentally friendly approaches will contribute to the correct decision-making on the integration of the domestic transport system into the transport network of the EU countries.

Analysis of recent research and publications. Multimodal, in particular, container and piggyback transportation, is defined by many authors as a promising way to deliver goods [1, 2]. The development of combined and multimodal transport in Ukraine involves the creation of a unified system for the functioning of the transport system, in particular, rail, water and road transport.

According to experts [3], transport accounts for 8 % of all carbon dioxide emissions on the planet. Therefore, the introduction of «green» technologies in logistics activities will make it possible to take certain steps towards preserving the climate on the planet suitable for human life. Therefore, «green» logistics, which appeared in the early 90s of the last century, refers to the concept of sustainable economic development [4].

The experience of the EU countries shows that the sources of revenues to national environmental funds are formed from taxes and payments for environmental pollution for further targeted use for environmental protection measures. At the same time, their essential difference from the Ukrainian funds for environmental protection is their legal status and independence from the state budget. Thus, the impact of environmental taxes and fees on operation features of the transport network is significant. The intensification of multimodal transportation with the participation of railways in Ukraine is carried out in the direction of increasing the share of railway transport in transportation [5], in particular, the following measures are envisaged:

- preservation of highways;
- reduction in the number of heavy trucks (container carriers) on long routes over 200 km;
- development of transportation by environmentally friendly modes of transport.

The strategy for the introduction of «green» logistics is one of the main ones in the

White Paper of the European Conference of Ministers of Transport (ECMT) [6], according to which the EU aims to transfer 30 % of road freight transport with a travel distance of more than $L_a = 300$ km to other modes of transport by 2030 (rail or water) and over 50 % by 2050. It can be expected that this will lead to a decrease in the competitive advantages of road transport, significantly increasing the tariffs for road freight. The analysis shows that the majority of freight transports with ECMT licenses far exceed the distance $L_a = 300$ km.

The joint UNECE, ECMT and EU document «Terminology of Combined Transport» [7] notes that multimodal transport is «the carriage of goods by two or more modes of transport», intermodal transportation means «carriage of goods by two or more modes of transport in the same cargo unit or vehicle without reloading the cargo itself when changing the mode of transport», combined transport – «intermodal transport within which the majority of the journey is by rail, inland waterway or sea transport and any initial and / or final segment of the journey on which road transport is used is as short as possible». Thus, the main feature of the supply chain of goods in containers based on «green» logistics is the absence of transshipment operations on the route, that is, the transportation of cargo without reloading it into another cargo unit.

In this context, all participants in freight transportation need to ensure environmental safety and environmental protection. This can be achieved by creating an environmental management system in accordance with the international standard DSTU ISO 14001, which contains a system of measures related to: impact on the atmospheric air; impact of parametric pollution (noise, vibration); impact on soils; impact on water bodies; waste handling.

The assessment of the environmental performance of the railway, as part of the logistics chain, can be made on the basis of the recommendations of the ISO / FDIS 14031:2021 standard [8], which allows determining the structure of the carrier's operating activities

and the factors, which influence on its environmental efficiency, waste generation processes and emissions.

Strategies for the implementation of «green» logistics involve the reduction of harmful emissions from mobile sources. However, the growth in demand for freight transport is closely linked to economic growth, so in an era of rapid global economic development, there is a strong correlation between the reduction of carbon dioxide emissions and the demand for freight transport [9]. A number of foreign studies are related to the prospects for reducing CO₂ emissions by reducing and adjusting the demand for transportation using methods such as optimization of planning a manufacturing enterprise [10], rational design of a logistics network [11], optimization of transport routes [12], application in freight transportation of road electric transport [13] and electrification of railways [14].

On the other hand, scientific research within the framework of the global Shift strategies aimed at reducing CO₂ emissions is focused on the analysis of the behavior of shippers in choosing a delivery method. To justify the choice of the method of transportation by the consignor, the study is devoted to the transfer of the flow of goods from roads to railways due to the competitiveness of the railway and its better environmental performance [12].

Thus, the prospect of «green» logistics in the field of rail and other modes of transport can be linked to the requirements of international ISO standards and regulations, which are a recognized tool for creating an effective environmental management system. The development of multimodal transportation of goods contributes to the introduction of «green» logistics technologies in the process of gradually abandoning long-distance (over 300 km) road freight transportation.

Determination of the purpose and task of the research. In modern conditions, important for economic recovery and relevant in the post-war period is the formation of a

scientifically based approach to the creation of effective supply chains for containerized cargo in unimodal and multimodal transportation, taking into account the impact of environmental factors. This meets the main objective of «green» logistics – the creation and development of transportation technologies that help reduce the negative impact of transport on the environment. This goal can be achieved through the rational integration of various modes of transport, in particular rail, with their interaction with a minimum participation of road transport.

For achieve this goal, the following tasks are solved:

- assess energy costs and harmful emissions into the environment during the transportation of containers by different modes of transport;

- assess the value of the environmental criterion for unimodal and multimodal transportation;

- make an assessment of the value of the fuzzy environmental criterion depending on the fuzzy terms «distance of transportation» and «size of CO₂ emissions»;

- build an assessment of the effectiveness of the proposed logistics chain;

- build an economic-mathematical model of a two-stage transport problem of goal-numerical programming.

The main part of the study. Studies show that road transport accounts for 72 % of all emissions. Therefore, it is obvious that by combining different modes of transport in a multimodal scheme, the harm from the impact of pollutants will be minimized. In particular, rail transport has the lowest CO₂ emissions compared to road and water transport: according to estimates, transporting 1000 tons of goods by rail requires three times less energy than transporting them by road. The approximate level of specific emissions of waste gases is given in [4, 16]. In particular, it is noted that a truck with a diesel engine has an estimate of CO₂ emissions at the level of 0.171 kg/h, and a shunting diesel locomotive at the level of 6.410 kg/h.

By summarizing the data given in works [4, 12, 16, 17] an assessment was made of energy costs and harmful emissions into the environment during the transportation of containers by various modes of transport:

- average specific electricity consumption by an electric locomotive 0.6040...0.6552 kW·h/TEU·km;

- average specific electricity consumption for railway electric traction, taking into account losses in the power supply system 0.6647...0.7208 kW·h/TEU·km;

- average specific emissions of harmful substances in railway electric traction CO₂ $\eta_m = 0.0033...0.0038$ g/TEU·km (in mixed mode of electricity generation by fuel oil/coal power plants);

- average specific emissions of harmful substances during shunting work CO₂ $\eta_{sh.loc} = 320.50$ g/TEU·h, (ChME-3 shunting diesel locomotive in engine operation mode Ne = 75 % of full power and shunting train consists of 10 wagons);

- average specific emissions of harmful substances of a truck CO₂ $\eta_a = 13.194$ g/TEU·km (6-cylinder diesel engine, average speed 60 km/h, full container load).

The assessment of the value of the environmental criterion for unimodal transportation by road can be calculated as the value of the harm from the negative impact of carbon dioxide on the atmospheric air [16, 18].

$$B_a = m_{TEU} \eta_a \sum_{n=1}^K (L_{ri} c_{ent.i}), \quad (1)$$

where L_{ri} – distance of unimodal transportation on the territory of the i -th state, km;

K – the number of transportation sections on the territory of other states (for domestic traffic $K=1$);

$c_{ent.i}$ – rate of environmental tax on polluting CO₂ emissions on the territory of the i -th state, UAH/t;

m_{TEU} – mass of cargo transported in a container (TEU), i.e.

Significance of the environmental criterion for multimodal transportation

$$B_M = m_{TEU} \left(\frac{\eta_m \sum_{n=1}^K (2L_{3i} c_{en.t i} + t_{sh.loc i} \eta_{sh.loc})}{\eta_a [L_{a1} c_{en.t 1} + L_{a2} c_{en.t K}]} \right), \quad (2)$$

where L_{mi} – distance of the railway part of the multimodal transportation on the territory of the i -th state, km;

2 - coefficient taking into account the return of the rolling stock to the owner country;

$t_{sh.loc i}$ – average duration of shunting operations with a multimodal unit, hour;

L_{a1}, L_{a2} – average distance, respectively, import and export of a multimodal unit, km.

In Ukraine, the environmental tax is a nationwide obligatory payment levied on actual volumes of emissions into the atmospheric air. According to Art. 14.1.57 of the Tax Code of Ukraine, the tax rate for carbon dioxide emissions is 30 hryvnia per 1 ton.

Through analysis, it was found that the carbon environmental tax rates vary significantly in different countries. To stimulate «green» technologies in Ukraine, it is planned to gradually increase it to 5 UAH/t every year. At the same time, the carbon environmental tax rates in developed countries range from 1.00 USD/t (Poland) up to 25 EUR/t in some EU countries and up to 139 USD/t (Sweden) [17].

The usual approach proposed above to determine the environmental criterion is determined on the basis of the calculation of a number of individual characteristics, which sufficiently reflects the essence of unimodal transportation. But its use for multimodal transportation does not allow to fully evaluate the effectiveness of this option, since it is necessary to use a generalized assessment of changes in the main indicators of delivery by several modes of transport to the final result. The number of indicators may be different, but they must be significant for the participants in the transportation, and also serve as the basis for substantiating management decisions on the formation of the logistics chain [19].

If we consider this in formal terms, then the value of the environmental criterion for the formation of a supply chain of goods based on «green» logistics is represented as a vector membership function of linguistic variables B .

$$\widehat{B}_M = \{ \mu_{b_1}(B), \mu_{b_j}(B), \dots, \mu_{b_N}(B) \}, \quad (3)$$

where b_i – desired level of performance of the j -th component of the indicator, the total number of which is N ;

$\mu_{b_j}(B)$ – membership function of the execution level of the fuzzy set indicator \widehat{B}_M .

The values of the linguistic variable B are fuzzy sets, the elements of which are the characteristics of the indicator. Each indicator has a constraint $\forall j \in N \exists b_j \in \bar{B}_j$, where \bar{B}_j there is a set of valid values for a particular indicator.

The formation of a fuzzy environmental criterion \widehat{B}_M can be used as the basis for a decision support system for choosing parameters and components of a multimodal logistics chain by assessing the impact of the environmental friendliness of each link using linguistic variables and obtaining fuzzy conclusions based on them [20].

Formally linguistic variable is defined as a set

$$B: \langle T, \bar{B}_j, G, W \rangle, \quad (4)$$

where B – denomination of the linguistic variable;

T – base term-set of linguistic variable values B ;

\bar{B}_j – universal set of admissible values of the indicator, which is the domain of definition of each term, namely $T \subseteq \bar{B}_j$;

G – syntactic procedure that allows you to operate on the elements of a term set T .

W – semantic procedure (rules) that makes it possible to turn each new value of a linguistic variable created by the procedure G into a fuzzy variable. Thus, it is possible to form the content of the corresponding fuzzy set.

To form a criterion, we introduce the concept of a fuzzy expression - these are

constructions of the form $\langle B_j \in B_j^* \rangle$, where B_j^* is the value of a linguistic variable, which corresponds to a fuzzy set on the universal set \bar{B}_j .

To obtain fuzzy conclusions, we will use the following semantic procedures W for transforming fuzzy statements. Rule for transforming the conjunctive form.

$$\langle B_1 \in B_1^* \wedge B_2 \in B_2^* \rangle \Rightarrow \langle (B_1, B_2) \in (B_1^* \cap B_2^*) \rangle, \quad (5)$$

where $B_1^* \cap B_2^*$ value of a linguistic variable (B_1, B_2) , that corresponds to the original expression $\langle B_1 \in B_1^* \wedge B_2 \in B_2^* \rangle$ and to which, for linguistic variables, B_1 and B_2 is assigned a fuzzy set $\hat{B}_1 \cap \hat{B}_2$ with a membership function $\mu_{\hat{B}_1 \cap \hat{B}_2}(\bar{B}_1, \bar{B}_2) = \mu_{B_1}(B_1^*) \cap \mu_{B_2}(B_2^*)$.

Disjunctive form transformation rule

$$\langle B_1 \in B_1^* \vee B_2 \in B_2^* \rangle \Rightarrow \langle (B_1, B_2) \in (B_1^* \cup B_2^*) \rangle, \quad (6)$$

where $B_1^* \cup B_2^*$ value of a linguistic variable (B_1, B_2) , that corresponds to the original expression $\langle B_1 \in B_1^* \vee B_2 \in B_2^* \rangle$ and to which, for linguistic variables, B_1 and B_2 is assigned a fuzzy set $\hat{B}_1 \cup \hat{B}_2$ with a membership function $\mu_{\hat{B}_1 \cup \hat{B}_2}(\bar{B}_1, \bar{B}_2) = \mu_{B_1}(B_1^*) \cup \mu_{B_2}(B_2^*)$.

The rule for the transformation of statements of the implicative form

$$\langle B_1 \in B_1^* \supset B_2 \in B_2^* \rangle \Rightarrow \langle (B_1, B_2) \in (B_1^* \rightarrow B_2^*) \rangle, \quad (7)$$

where $(B_1^* \rightarrow B_2^*)$ value that corresponds to the value of a linguistic variable (B_1, B_2) .

The formation of the value of the ecological criterion B_m and the formalization of the decision support system will be carried out using logical-linguistic methods for

describing systems in terms of linguistic variables and considered as a set of linguistic statements of the following type.

$$\widehat{B}_m = \begin{cases} B_1: \langle B_{11} \wedge |V| \supset B_{12} \dots \wedge |V| \supset B_{1N} \rangle \Rightarrow \langle B_{11}^* \wedge |V| \supset B_{12}^* \dots \wedge |V| \supset B_{1N}^* \rangle \\ B_2: \langle B_{21} \wedge |V| \supset B_{22} \dots \wedge |V| \supset B_{2N} \rangle \Rightarrow \langle B_{21}^* \wedge |V| \supset B_{22}^* \dots \wedge |V| \supset B_{2N}^* \rangle \\ \dots \\ B_j: \langle B_{j1} \wedge |V| \supset B_{j2} \dots \wedge |V| \supset B_{jN} \rangle \Rightarrow \langle B_{j1}^* \wedge |V| \supset B_{j2}^* \dots \wedge |V| \supset B_{jN}^* \rangle \end{cases}, \quad (8)$$

where $\langle B_{ij} \rangle$, $i=1,2,\dots,N$ $j=1,2,\dots,k$ – fuzzy statements on the corresponding values of input linguistic variables;

$\langle B^*_{ij} \rangle$, $i=1,2,\dots,N$ $j=1,2,\dots,k$ – fuzzy statements on the corresponding values of the output linguistic variables.

Aggregate of rules (8) will be called a fuzzy knowledge base, which reflects the functional relationship between input and output fuzzy variables and is the basis for constructing a fuzzy generalized relation

$$\mu_{b_j}(\bar{B}_j) = \cup_{B_j \in B_j^*} [\mu_{b_i}(\bar{B}_j) \cap \mu_b(\bar{B})]. \tag{9}$$

Thus, the compositional rule of inference in this case sets the law of functioning of the fuzzy model. The fuzzy conclusion of the value of the environmental criterion B_m can be carried out in four known stages [22, 23]: fuzzification, direct fuzzy inference, accumulation of results, defuzzification using the «center of gravity» method.

To evaluate suggest approach, it is proposed to evaluate the value of the fuzzy environmental criterion depending on the fuzzy terms «distance of transportation» and «size of CO₂ emissions». Obviously, the number of terms can be increased, which will improve the accuracy of the result.

An analysis of the size of emissions (for the railway part of transportation) allows us to establish three stable segments, which can be conditionally divided into «high», «medium»

defined on a universal set \bar{B}_j for input and output variables. The relation of the interconnections is built according to the compositional rule of Zadeh [21]

and «small». Thus, the obtained terms of the linguistic variable B_{11} =<high>, B_{21} =<medium> and B_{31} =<low> on the fuzzy set \bar{B}_1 =<size of CO₂ emissions>, the membership functions of which are established by the method of expert assessments, and are shown in fig. 1.

The membership functions for the set of terms \bar{B}_2 =<transportation distance> and for the set \bar{B}_m =<environmental criterion> are set in a similar way. Thus, a fuzzy set of linguistic statements, which can be used as the basis for a model for evaluating the effectiveness of the logistics chain, will look like:

$$\hat{B}_m = \begin{cases} B_1: \langle B_{11} \wedge B_{12} \rangle \rightarrow \langle B_{11}^* \wedge B_{12}^* \rangle \\ B_2: \langle B_{21} \wedge B_{22} \rangle \rightarrow \langle B_{21}^* \wedge B_{22}^* \rangle \\ B_3: \langle B_{31} \wedge B_{32} \rangle \rightarrow \langle B_{31}^* \wedge B_{32}^* \rangle \end{cases}. \tag{10}$$

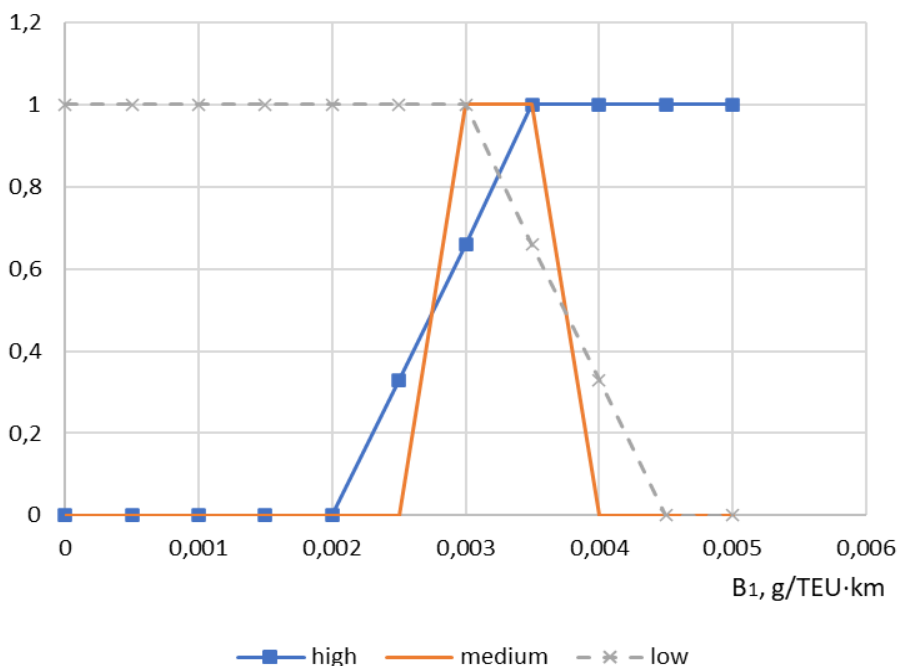


Fig. 1. Fuzzy set membership functions \bar{B}_1 =<size of CO₂ emissions>

The results of execution of (9) on (10) at different transportation distances ($L=200$ km and $L=300$ km) are shown in fig. 2.

The result obtained indicates that the value of the environmental criterion \widehat{B}_m worsens with a decrease in the distance of transportation, and its influence on the total cost of transportation increases. Obviously, the proposed approach is quite universal and can be extended and refined by introducing new terms and statements.

The formation of the supply chain of cargo in containers, taking into account the environmental criterion, is proposed to be solved as a multi-stage transport problem of integer programming with fuzzy criteria. In multi-stage transport tasks, containers from suppliers first arrive at intermediate points (distribution terminals, in our case, these are interstate crossing points), where, if necessary, they are reloaded or stored. That is, products are supplied to end consumers not from suppliers, but from the indicated intermediate points of transport networks (fig. 3).

In this example, the stocks of products from suppliers, the throughput of intermediate points, the needs of consumers, as well as the tariffs and environmental criteria for the transportation of a container (TEU), as well as the throughput of each of the routes, are considered known. Under these conditions, it is necessary to determine the most economical plan for transporting products from suppliers to consumers.

Denote the number of suppliers as m , and the volume of containers each of them has as $a_i (i = \overline{1, m})$. The number of consumers will be denoted by n , the demand for containers of each consumer - by $b_j (j = \overline{1, n})$. It is assumed that the transportation of products from suppliers to consumers will be carried out in two stages. First, products from suppliers will go to intermediate points, and from intermediate points to consumers (fig. 3). The number of intermediate points will be denoted by p , and the throughput of a separate k -th intermediate point by $c_k (k = \overline{1, p})$.

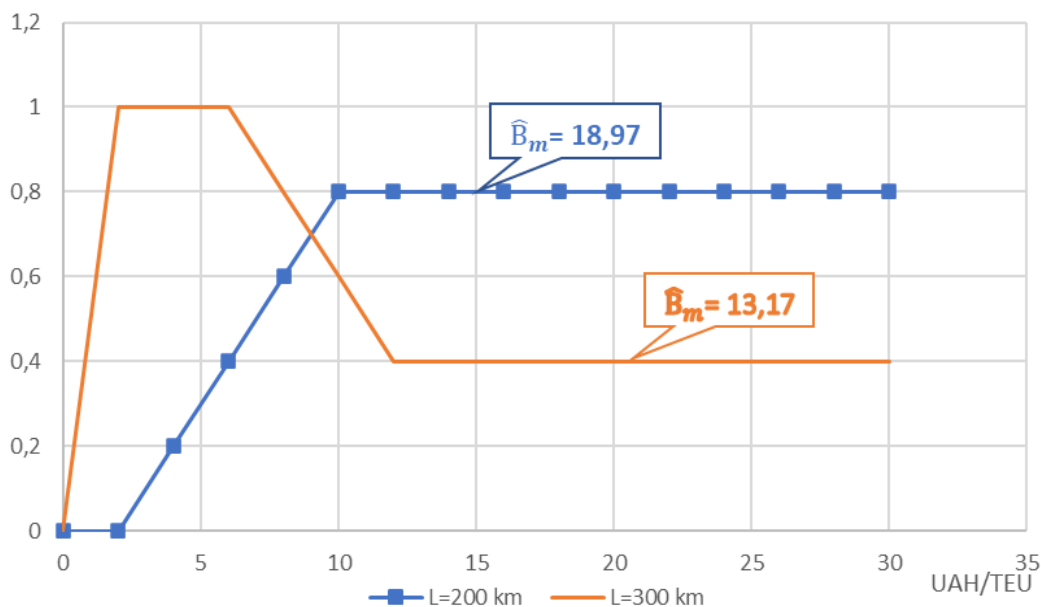


Fig. 2. Estimation of the values of the fuzzy environmental criterion \widehat{B}_m for a transportation distance of 200 km and 300 km

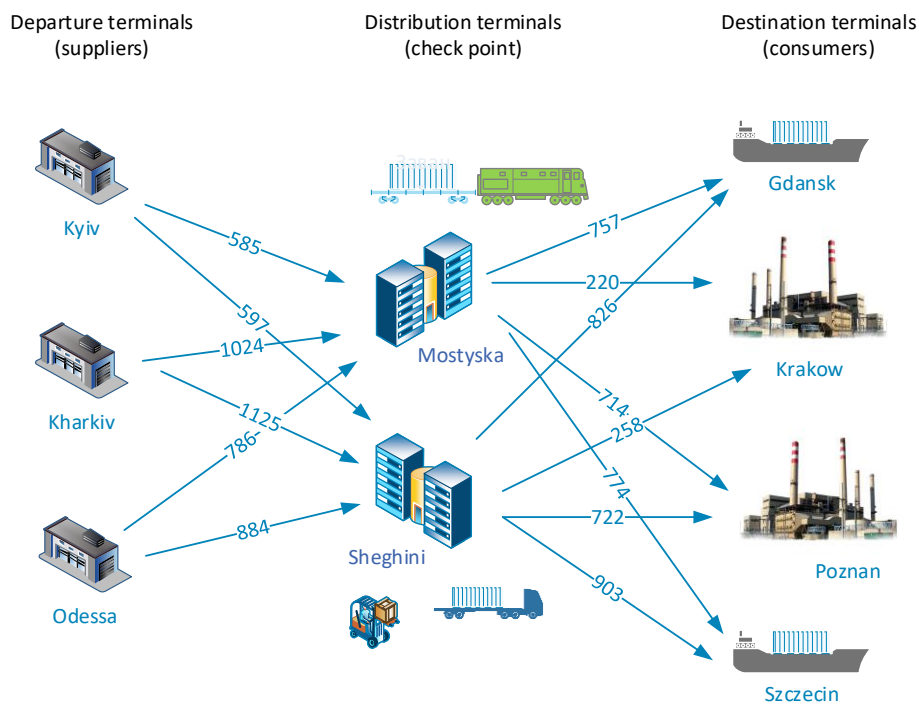


Fig. 3. Diagram of the supply chain of cargo in containers (the arrows show the distance in km)

Cost of transporting a unit of production from the i -th supplier to the k -th intermediate point will be denoted by $s_{ik} (i = \overline{1, m}; k = \overline{1, p})$, and the cost of transporting a unit of production from the k -th intermediate point to the j -th consumer by $t_{kj} (k = \overline{1, p}; j = \overline{1, n})$. Necessary to find the volumes x_{ik} of transportation products from suppliers to intermediate points

($i = \overline{1, m}; k = \overline{1, p}$) and the volumes y_{kj} of transportation of products from intermediate points to consumers ($k = \overline{1, p}; j = \overline{1, n}$), so that the total cost Ψ of all transportation would be minimal.

Under the given conditions and notation, the economic and mathematical model of a two-stage transport problem of integer programming with fuzzy criteria takes the form.

$$\Omega = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p (s_{ik} + \hat{B}_{mi}) x_{ik} + \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^n (t_{kj} + \hat{B}_{mj}) y_{kj} \rightarrow \min, \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^p x_{ik} \leq a_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^p y_{kj} = b_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = \sum_{j=1}^n y_{kj} \leq c_k, \quad k = \overline{1, p}, \quad (14)$$

$$x_{ik} \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, p}, \quad (15)$$

$$y_{kj} \geq 0, \quad k = \overline{1, p}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (16)$$

$$L_{akj} \leq La, \quad k = \overline{1, p}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^n b_j \leq \sum_{k=1}^p c_k. \quad (17)$$

The objective function (11) corresponds to the search for an economic plan for container transportation. Other conditions of the problem mean, respectively:

(12) - the volume of containers taken out from each supplier should not exceed the stock available to him;

(13) - the volume of containers delivered to each consumer must correspond to his demand;

(14) - all containers that will be imported to each intermediate point from suppliers should then be sent to consumers, and the throughput of each waypoint should be taken into account;

(15) - volumes of container traffic on each of the routes should be inalienable;

(16) - the distance of transportation of containers from intermediate points to consumers by road should not exceed the maximum allowable permissible value L_a from an environmental point of view;

(17) - the capacity of all intermediate points is sufficient to process the total flow of products in the transport network.

Tariffs for the transportation of containers by rail and road are taken in accordance with data from open sources and approximated by a linear function with an error below 1 % (fig. 4). Intermediate points - transitions are accepted, respectively, as multimodal - Mostyska, unimodal (vehicles) - Shegini (fig. 3). The maximum processing capacity of the transshipment points is 180 weights/day.

The solution of the two-stage transport problem of integer programming with fuzzy criterion (11) was carried out by the generalized reduced gradient method. The total minimum costs for ensuring the delivery of containers, taking into account the environmental criterion, amounted to UAH 15,475,223. during the trial month. In the basic version of transportation distribution, the costs amounted to UAH 15,595,678, i.e., savings from optimization amounted to UAH 120,455/month, and the annual savings estimate was UAH 1,445,460/year, or at the level of 7 %.

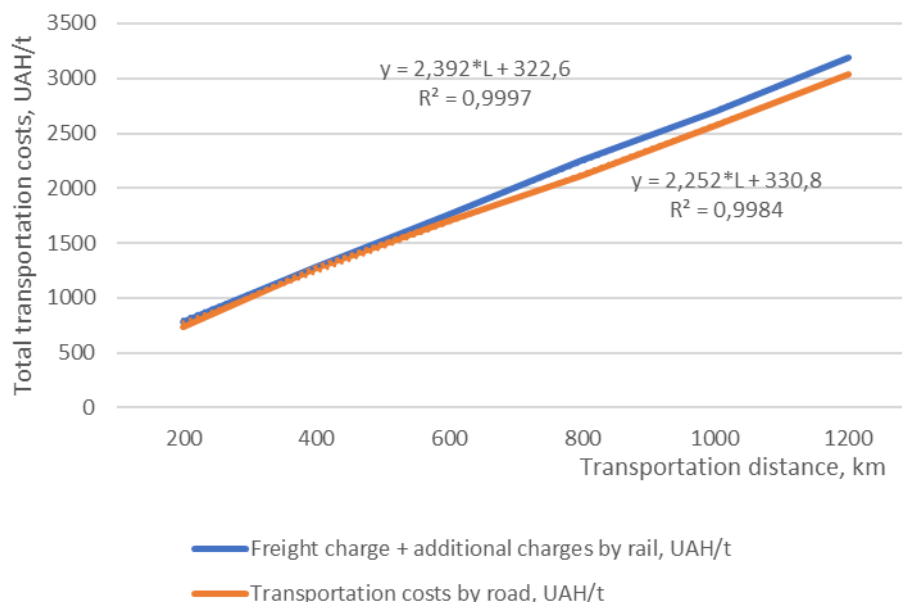


Fig. 4. Determining the level of costs for the transportation of 1 ton of cargo in containers by rail and road

According to the calculated data, the total minimum costs for ensuring the delivery of containers amounted to about UAH 15.5 million during the pilot month. During the simulation, an experiment was carried out to determine the share attributable to the multimodal option for the delivery of containerized cargo, depending on the level of load capacity of the distribution points. It has been established that with an increase in the throughput of automobile distribution points,

the container flow is gradually moving to a unimodal automobile transportation method. This can be explained by a certain delay of containers during reloading from 1520 mm gauge cars to 1435 mm gauge cars. But when applying promising environmental conditions and restrictions, the share attributable to the transportation of containers by road does not exceed 15 % (fig. 5), that is, there is an effect of increasing the share of the multimodal method of transporting containers.

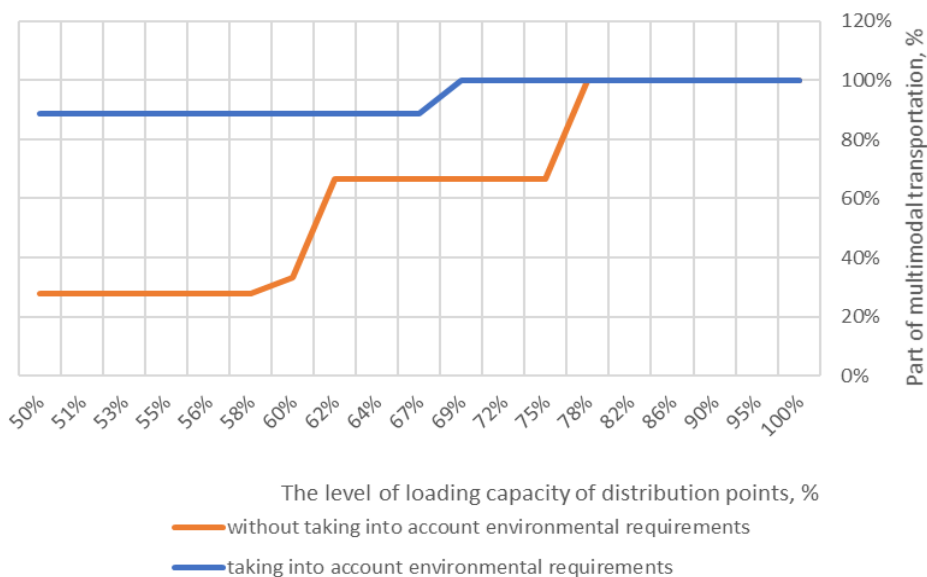


Fig. 5. Determination of the share attributable to the multimodal option for the delivery of containerized cargo

Conclusions. According to the forecast in 2024-2050, the total amount of CO₂ emissions in the cargo transportation sector in Ukraine will increase by 3.9 times. Growth in CO₂ emissions from road and rail transport by 2050 will be 240 % and 600 %, respectively. The introduction of «green» logistics technologies is facilitated by the introduction of multimodal technologies for the transportation of goods. This allows us to identify the following promising areas of activity in this area:

- gradual expansion of the network of logistics and multimodal centers throughout the country, starting with large transport hubs, and the introduction of multimodal technologies will help reduce the level of the

integrated air pollution index in most transport hubs by 1-3 %;

- reducing the share of unimodal road transport over a distance of more than 300 km, replacing them with multimodal ones involving rail and water transport will improve environmental performance in the transportation of container cargo, while reducing the number of flights and reducing the harmful environmental impact of the railway roads, the level of emissions of pollutants into the atmosphere can be reduced by almost 200 times, and for CO₂ emissions - by almost 300 times;

- multimodal technology of transportation in domestic transport communications saves 6.1 times on

environmental tax, and 9.8 times in international transport compared to unimodal;

- delimitation of freight and passenger traffic on especially busy railway sections, as well as seasonal use of multimodal technologies for the delivery of goods and passengers in areas with difficult road conditions or in conditions of railway stations with low volumes of work;

- with a view to formalize the supply chain of goods, taking into account the environmental criterion and the requirements of «green» logistics, the economic and mathematical model of a multi-stage transport problem of integer programming with fuzzy criteria has been improved.

References

1. Kushnir H. M. Naukovo-tekhnichni doslidzhennya u haluzi transportu: kolektyvna monohrafiya / za zah. red. D. V. Lomot'ka. Ivano-Frankivs'k, 2022. 216 p.
2. Ischuka O., Lomotko D. Transport Means: Proceedings of 25th International Scientific Conference. Lietuva, Kaunas: 6-8 oktober, 2021. P. 58–63.
3. Palanivelu P., Dhawan M. Green Logistics. White Paper Tata Consulting Systems. 2010. URL: https://www.academia.edu/28094615/Green_Logistics_Whitepaper (last access: 01.06.2023).
4. Lomotko D., Ohar O., Kozodoi D., Barbashyn V., Lomotko M. Efficiency of «Green» Logistics Technologies in Multimodal Transportation of Dangerous Goods. Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, 2022. Vol. 536. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_74. (last access: 01.06.2023).
5. National transport strategy of Ukraine for the period up to 2030: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 30.05.2018 r № 430-p. 2018. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80>. (last access: 02.06.2023).
6. The White Paper of the European Commission - a plan for the development of a single European transport space - on the way to a competitive and resource-efficient transport system. Publishing Center of the European Union. Luxembourg, 2011. P. 28. DOI:10.2832/30955.
7. Terminology on combined transport: Economic Commission For Europe TRANS/WP.24/2000/1. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/wp24/documents/wp24-00-1e.pdf>.
8. ISO/FDIS 14031:2021. Environmental management — Environmental performance evaluation — Guidelines. [Effective from 2022-03]. 2022. URL: <https://www.iso.org/standard/81453.html> (last access: 02.06.2023).
9. Muratori M., Steven J. Smith. Role of the Freight Sector in Future Climate Change Mitigation Scenarios. *Environmental Science & echnology*. 2017. T. 6, № 51. DOI: 10.1021/acs.est.6b04515.
10. Holmström J., Gutowski T. Additive manufacturing in operations and supply chain management: No sustainability benefit or virtuous knock-on opportunities. *Journal of Industrial Ecology*. 2017. T. 21, № S1. P. 21-24. DOI: 10.1111/jiec.12580.
11. Yang Y. L., Zhang J., Sun W. J., Yun P. Research on NSGA-III in Location-routing-inventory problem of pharmaceutical logistics intermodal network J. *Intell. Fuzzy Syst.* 2021. T. 1, № 41. P. 699-713. DOI:10.3233/JIFS-202508.
12. Li L., Zhang X. Reducing CO2 emissions through pricing, planning, and subsidizing rail freight Transport. *Res. Transport Environ.* 2020. T. 87. Article 102483. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102483.
13. Qi Y. X., Harrod S., Psaraftis H. N., Lang M. Transport service selection and routing with carbon emissions and inventory costs consideration in the context of the Belt and Road

Initiative Transp. Pt. e-Logist. Transp. 2022. T. 159. Article 102630. DOI:10.1016/j.tre.2022.102630.

14. Zhang X., Lin Z., Crawford C., Li S. Techno-economic comparison of electrification for heavy-duty trucks in China by 2040. Part D-Transport Environ. 2022. T. 102. Article 103152. DOI:10.1016/j.trd.2021.103152.

15. Jensen A. F., Thorhauge M., Jong G. D., Rich J., Dekker T., Johnson D. A disaggregate freight transport chain choice model for Europe Transp. Pt. e-Logist. Transp. 2019. T. 121. P. 43-62. DOI: 10.1016/j.tre.2018.10.004.

16. Kossov V. S., Redin A. L., Olentsov A. A. Sravnitel'nyy analiz zagryazneniya atmosfery morskim i zheleznodorozhnym transportom pri tovaroobmene mezhdru Vostochnoy Aziyey i Yevropy. *Vestnik VNIKTI*. Russia, Kolomna, 2017. № 100. P. 108–115.

17. Lomotko D. V., Ogar O. M., Kozodoy D. S., Baydina K. S., Lomotko M. D. Ekolohichni aspekty zastosuvannya «zelenoyi» lohistyky pry mul'tymodal'nykh vantazhnykh perevezennyakh. *Zaliznychnyy transport Ukrayiny*. 2021. № 2. P. 49-62. DOI: 10.34029/2311-4061-2021-139-2-49-62.

18. Taxing CO2 emissions from road transport : Taxing Energy Use 2018. April 30, 2019. URL: <https://www.compareyourcountry.org/taxing-energy&page=1 &visited=1> (last access: 03.06.2023).

19. Lomotko D. V. Pidvyshchennya efektyvnosti tekhnolohiyi rozpodilu rukhomoho skladu na polihoni. *Zb. naukovykh prats' DonYYZT*. Donetsk, 2005. № 3. P. 5.

20. Developers of Your Spreadsheet's Solver: Optimization Concepts. 2002. URL: <http://www.frontsys.com>. (last access: 03.06.2023).

21. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Inf. Control*. 1965. T. 8. P. 338-353.

22. Lomotko D. V. Metod otsinky ta vidboru nechitkoyi informatsiyi pry formuvanni system pidtrymky pryynyattya rishen' u pidrozdilakh zaliznyts'. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti*. Kharkov, 2007. № 2. P. 3- 9.

23. Druz V. A., Samsonkin V. N. Edynaya teoryya samoorhanyzuyushchykhysya system: monohrafyya. Kiev: Talkom, 2022. P. 123.

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, 61050, м. Харків. Тел.: +380675760661. E-mail: den@kart.edu.ua. <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

Огар Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, 61050, м. Харків. Тел.: + 380973232170. E-mail: ogar.07.12@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-1967-5828>.

Ломотько Микола Денисович, аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, 61050, м. Харків. Тел.: +380675748381. E-mail: kolyanl890@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-0294-2686>.

Афанасова Ольга Федорівна, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, 61050, м. Харків. Тел.: +380632344943. E-mail: afanasova_olya@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-4921-6534>.

Lomotko Denys Viktorovych, Doctor of technical science, professor, Head of the Department "Transport Systems and Logistics", Ukrainian State University of Railway Transport, Maidan Feuerbacha, 7, Kharkiv, 61050. Phone: +380675760661. E-mail: den@kart.edu.ua. <http://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

Ohar Oleksandr Mykolayovych, Doctor of technical science, professor, Head of the department "Railway stations and junctions", Ukrainian State University of Railway Transport, Maidan Feuerbacha, 7, Kharkiv, 61050. Phone: + 380973232170. E-mail: ogar.07.12@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-1967-5828>.

Lomotko Mykola Denysovych, Postgraduate student of the department "Railway stations and hubs", Ukrainian State University of Railway Transport, Maidan Feuerbacha, 7, Kharkiv, 61050. Phone: +380675748381. E-mail: kolyanl890@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-0294-2686>.

Afanasova Olga Fedorivna, Postgraduate student of the department "Transport systems and logistics", Ukrainian State University of Railway Transport, Maidan Feuerbacha, 7, Kharkiv, 61050. Phone: +380632344943. E-mail: afanasova_olya@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-4921-6534>.

Статтю прийнято 11.09.2023 р.

УДК 621.314

**ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА СОНЯЧНИХ
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ РОЗПОДІЛЕНОГО
ВІДСТЕЖЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ПАНЕЛІ**

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

**STUDY OF THE ENERGY CONVERSION SYSTEM AT SOLAR POWER PLANTS
USING DISTRIBUTED MONITORING MAXIMUM POWER OF THE
PHOTOELECTRIC PANEL**

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, postgraduate D. A. Hordiienko

Анотація. Проведено аналіз перетворювачів, що керують лише частиною вихідної потужності у фотоелектричних системах. Розглянуто архітектуру розподіленого відстеження максимальної потужності, що є одним з найбільш перспективних рішень для подолання недоліків, пов'язаних зі зменшенням енергоефективності фотоелектричних панелей. Наведено топологію автотрансформаторного прямоходового перетворювача постійного струму для фотоелектричних панелей. Подано принцип роботи перетворювача та протікання струму у схемі під час перемикання. Отримано методику розрахунку вихідної потужності перетворювача в архітектурі DMPPT з послідовним з'єднанням, при якому напруга кола фіксується центральним інвертором, залежить від генерованої потужності фотоелектричних панелей, підключених до одного кола. Проведено розрахунок генерованої потужності фотоелектричними панелями залежно від стану їхнього затінення.

Ключові слова: автотрансформатор, прямоходовий перетворювач, сонячна електростанція, фотоелектрична панель.

Abstract. One of the most important purpose of photovoltaic power plants is to obtain the maximum possible energy. The analysis of converters controlling only a part of the output power in photovoltaic systems was carried out. The architecture of distributed maximum power tracking is one of the most promising solutions to overcome the shortcomings associated with the reduction of the energy efficiency of photovoltaic panels. It was determined that in order to obtain greater flexibility regarding the number of photovoltaic panels in a photovoltaic circuit, a voltage converter is needed that can both increase and decrease the output voltage. The topology of the autotransformer DC converter for photovoltaic panels is given. The main component of the topology of the forward converter is the autotransformer. The principle of operation of the converter and the flow of current in the circuit during switching are presented. The power generated by photovoltaic panels was calculated depending on the state of their shading. Assuming that all PV panels generate maximum power regardless of the shading condition, the input voltage and power of the converter are established. The method of calculating the output power of the converter in the DMPPT architecture with a series connection, in which the circuit voltage is fixed by the central inverter, depends on the generated power of the photovoltaic panels connected to one circuit, is obtained. Regardless of the inverter topology, the higher the percentage of shaded PV panels, the less power can be produced. Increased converter efficiency means that more power can

be produced in a solar power plant by using an autotransformer step-up converter. The main features of the proposed converter are high efficiency and the ability to both increase and decrease the output voltage relative to the input voltage.

Keywords: autotransformer, forward-flyback converter, solar power plant, photovoltaic panel.

Вступ. Застосування сонячної енергії для руху транспорту є перспективним напрямом у сфері розвитку транспортних технологій. Різновиди транспортних засобів, що для пересування використовують енергію сонця, як правило, комплектуються сонячними батареями, фотоелементи яких перетворюють видиме сонячне світло, інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання в електричну енергію, використовувану для живлення їхніх електродвигунів. Проте існує група факторів, що негативно впливають на швидкість розвитку та впровадження сонячних технологій у світову інфраструктуру. У той час, коли застосування сонячних батарей забезпечує високу ефективність роботи електричних транспортних засобів у ясну, сонячну погоду, у вечірній і нічний час, а також у дні похмурої погоди використання цих фотоелектричних елементів зовсім не практично [1].

Ефективність виробництва сонячної енергії залишається низькою через обмеження ефективності сонячних елементів як основи фотоелектричних систем виробництва електроенергії [2, 3].

Однією з найважливіших цілей роботи фотоелектричних електростанцій є отримання максимально можливої енергії. Через явища, пов'язані з системами сонячних електростанцій, зазвичай виникають явища зменшення енергоефективності фотоелектричних панелей. Найбільш поширеними причинами зменшення енергоефективності є тіні, бруд, перепади температур і т. п. [4, 5]. Отже, через цю проблему потужність, що виробляється фотоелектричною установкою, може бути суттєво знижена.

Архітектура розподіленого відстеження максимальної потужності (DMPPT) є одним з найбільш перспективних рішень для подолання недоліків, пов'язаних зі зменшенням енергоефективності фотоелектричних панелей [6, 7]. У такій архітектурі є перетворювач постійного струму, призначений для відстеження точки максимальної потужності кожної фотоелектричної панелі. Для забезпечення найбільшої гнучкості перетворювач повинен мати можливість підвищувати і знижувати напругу.

Іншою бажаною характеристикою перетворювачів, застосовуваних в архітектурі DMPPT, є висока ефективність, однак один з основних недоліків – висока вартість через велику кількість використовуваних перетворювачів [8, 9].

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку та результатах, частково опублікованих у роботах [10, 11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових дослідженнях деякі автори отримали високу ефективність перетворювачів, що керують лише частиною вихідної потужності, наприклад перетворювачі з послідовним з'єднанням, паралельною обробкою потужності або прямою передачею енергії [12, 13]. Проте для застосування у фотоелектричних системах такі топології перетворювачів малоефективні.

У роботах [14, 15] наведено загальні підходи, застосовувані для різних цілей, наприклад зменшення навантаження, розподілення потужності пропорційно номіналам генератора, збільшення терміну служби акумуляторів. Однак для модульних підпанельних фотоелектричних

перетворювачів напруга шини постійного струму не регулюється відповідно до зміни навантаження.

У роботах [16, 17] наведено методи визначення потужності фотоелектричних панелей, засновані на попередньому визначенні математичної функції, що описує вихідні характеристики. Але, враховуючи те, що на отримання максимально можливої енергії від панелі впливають конкретні умови інсоляції та навантаження, такі методи лише наближено визначають розташування точки максимальної потужності.

У роботі [18] наведено метод, заснований на підгонці робочої характеристики панелі до точки максимальної потужності фотоелектричних систем. Незважаючи на те, що така методика намагається відстежити точку максимальної потужності без прямого обчислення добутку напруги і струму для потужності панелі, значним недоліком є те, що не відображено характеристики, на які впливають негативні комплексні фактори, такі як затінення, пошкодження панелі та можливий вихід з ладу окремих елементів.

У роботі [19] наведено топологію зворотногоходового перетворювача з послідовним з'єднанням, для якого ККД становить понад 97%. Однак основним обмеженням цієї топології є те, що її можна використовувати тільки тоді, коли вихідна напруга вища за вхідну.

Також відомі деякі дослідження, присвячені топологіям, здатним як підвищувати, так і знижувати вихідну потужність у фотоелектричних панелях [20, 21]. Такі топології мають ефект підвищення ефективності. Але, оскільки інтенсивність сонячного світла, що потрапляє на панель, відрізняється залежно від сезону, часу та погоди, підвищення ефективності самої системи обмежене.

Отже, питання застосування сонячних фотоелектричних панелей, що, крім того, дає змогу суттєво скоротити витрати на паливо, покращити умови проїзду в транспортних засобах, сприяє зниженню шкідливого впливу на довкілля, подальшому пошуку високоефективних і недорогих перетворювачів електричної енергії, є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження системи перетворення енергії на сонячних електростанціях за рахунок використання розподіленого відстеження максимальної потужності фотоелектричної панелі, що дасть змогу підвищити енергетичну ефективність роботи перетворювача. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- розглянути архітектуру розподіленого відстеження максимальної потужності фотоелектричної панелі;
- подати топологію автотрансформаторного прямоходового перетворювача;
- навести результати розрахунку генерованої потужності фотоелектричними панелями.

Основна частина дослідження.
Архітектура розподіленого відстеження максимальної потужності. В архітектурі фотоелектричних установок розподіленого відстеження максимальної потужності фотоелектричні панелі ізолюються одна від одної, зменшуючи вплив негативних явищ на вироблення електричної енергії (рис. 1) [22, 23].

Одним із впливів на вироблення електроенергії є тінь на фотоелектричній панелі [24, 25]. На рис. 2, 3 відповідно наведено порівняння характеристик незатіненої та затіненої на 75% фотоелектричної панелі.

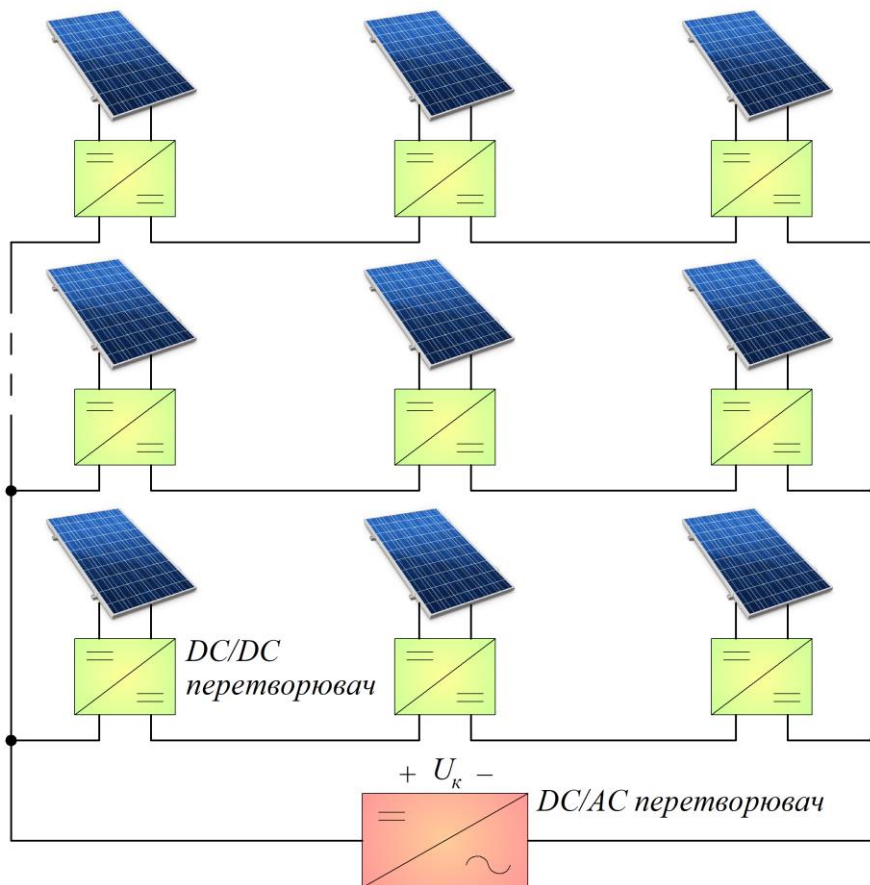


Рис. 1. Архітектура фотоелектричних установок розподіленого відстеження максимальної потужності

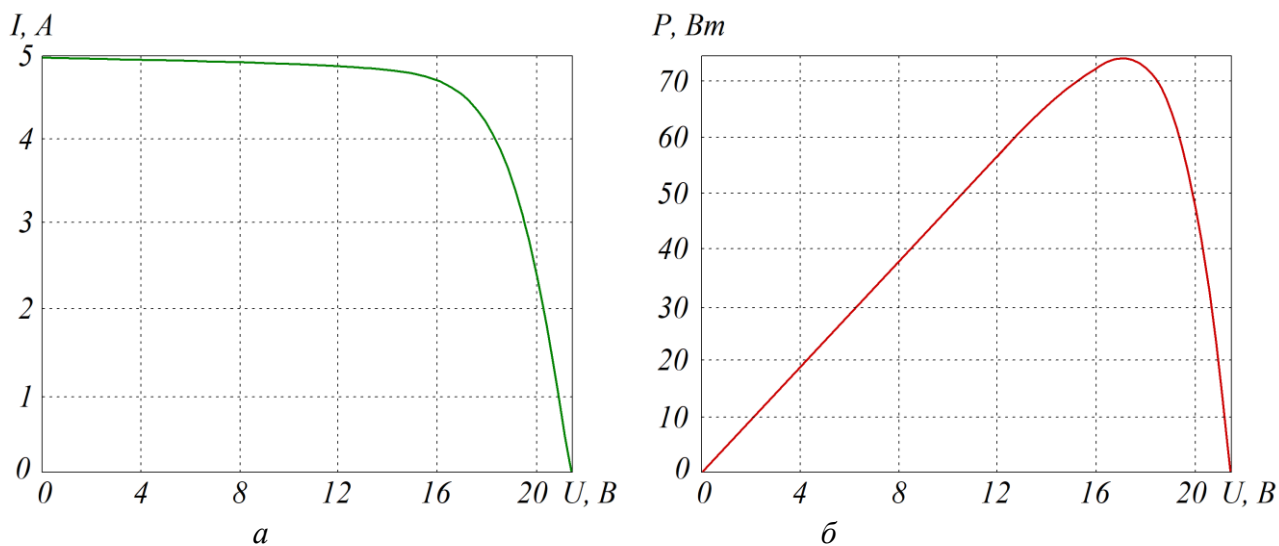


Рис. 2. Характеристики незатіненої фотоелектричної панелі:
 a – вольт-амперна характеристика фотогальванічних елементів; b – потужність, що виробляється фотоелектричною панеллю

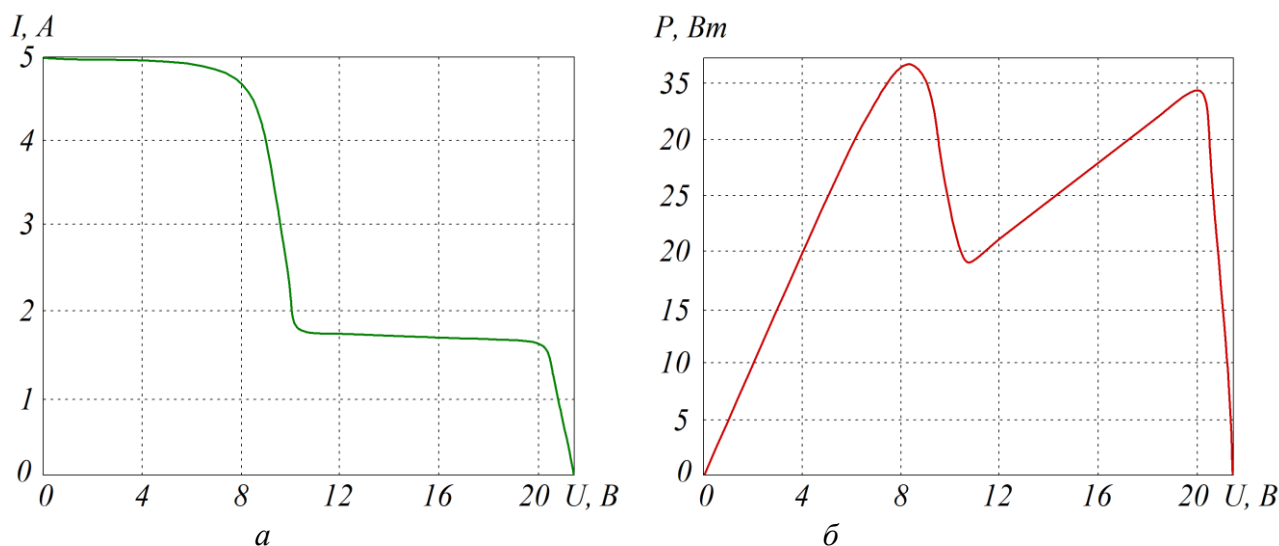


Рис. 3. Характеристики затіненої на 75 % фотоелектричної панелі:
 a – вольт-амперна характеристика фотогальванічних елементів; b – потужність, що виробляється фотоелектричною панеллю

Як видно, для незатіненої фотоелектричної панелі існує тільки одна точка максимальної потужності, а затінена фотоелектрична панель має дві точки максимальної потужності. У цьому випадку, крім зниження потужності, вплив тіні також змінює абсолютну напругу. Через таку поведінку, якщо перетворювач постійного струму здатний лише підвищувати або знижувати вихідну напругу, можливо, деякі фотоелектричні панелі не працюватимуть у точці максимальної потужності, навіть в архітектурах DMPPT.

Оскільки найнижча ефективність досягається при затіненні фотоелектричних панелей, потрібно більше фотоелектричних панелей на коло, якщо перетворювач постійного струму здатний тільки знижувати напругу. Навпаки, при використанні підвищувального перетворювача потрібно менше фотоелектричних панелей на коло і більше кіл [26, 27].

Отже, щоб отримати більшу гнучкість щодо кількості фотоелектричних панелей у фотоелектричному колі, необхідний перетворювач напруги, що може як

підвищувати вихідну напругу, так і знижувати.

Топологія автотрансформаторного прямоходового перетворювача постійного струму для фотоелектричних панелей. На рис. 4 наведено топологію автотрансформаторного прямоходового перетворювача (АПП).

Основним компонентом топології прямоходового перетворювача є автотрансформатор. Спосіб підключення автотрансформатора має два важливі наслідки. З одного боку, завдяки тому, що індуктивність намагнічування автотрансформатора L_n розмагнічує вихідний фільтр, розміри його можуть бути зменшені. З іншого боку, існує шлях під час вмикання перемикача S із прямою передачею енергії від джерела введення до вихідного фільтра без магнітної обробки автотрансформатором. Отже, підвищується ККД перетворювача, оскільки лише частина енергії обробляється магнітним способом. Цей принцип аналогічний перетворювачам послідовного з'єднання [28, 29].

Принцип роботи АПП у двох станах наведено на рис. 5.

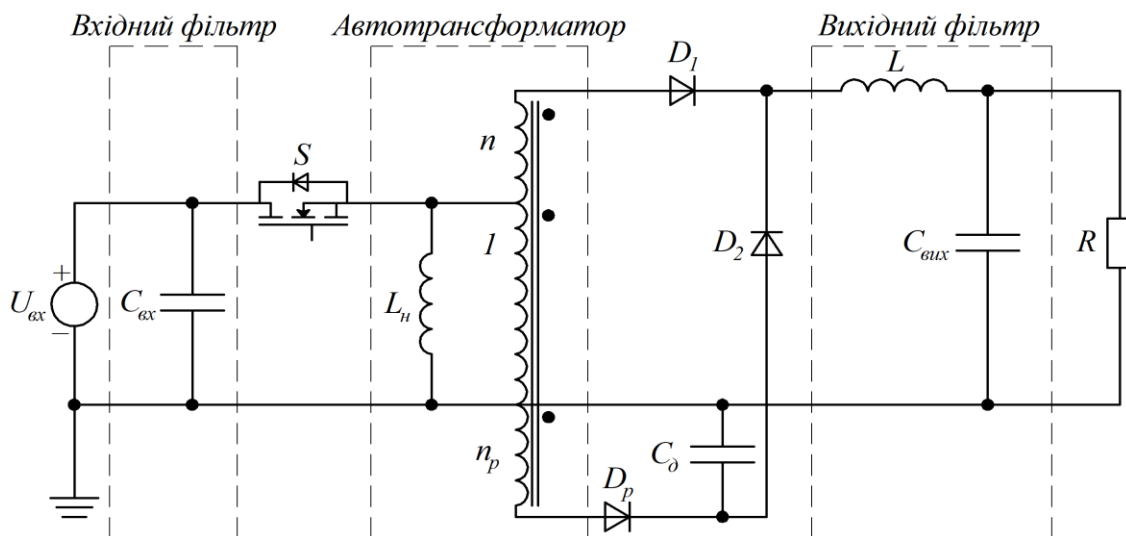


Рис. 4. Електрична схема автотрансформаторного прямоходового перетворювача

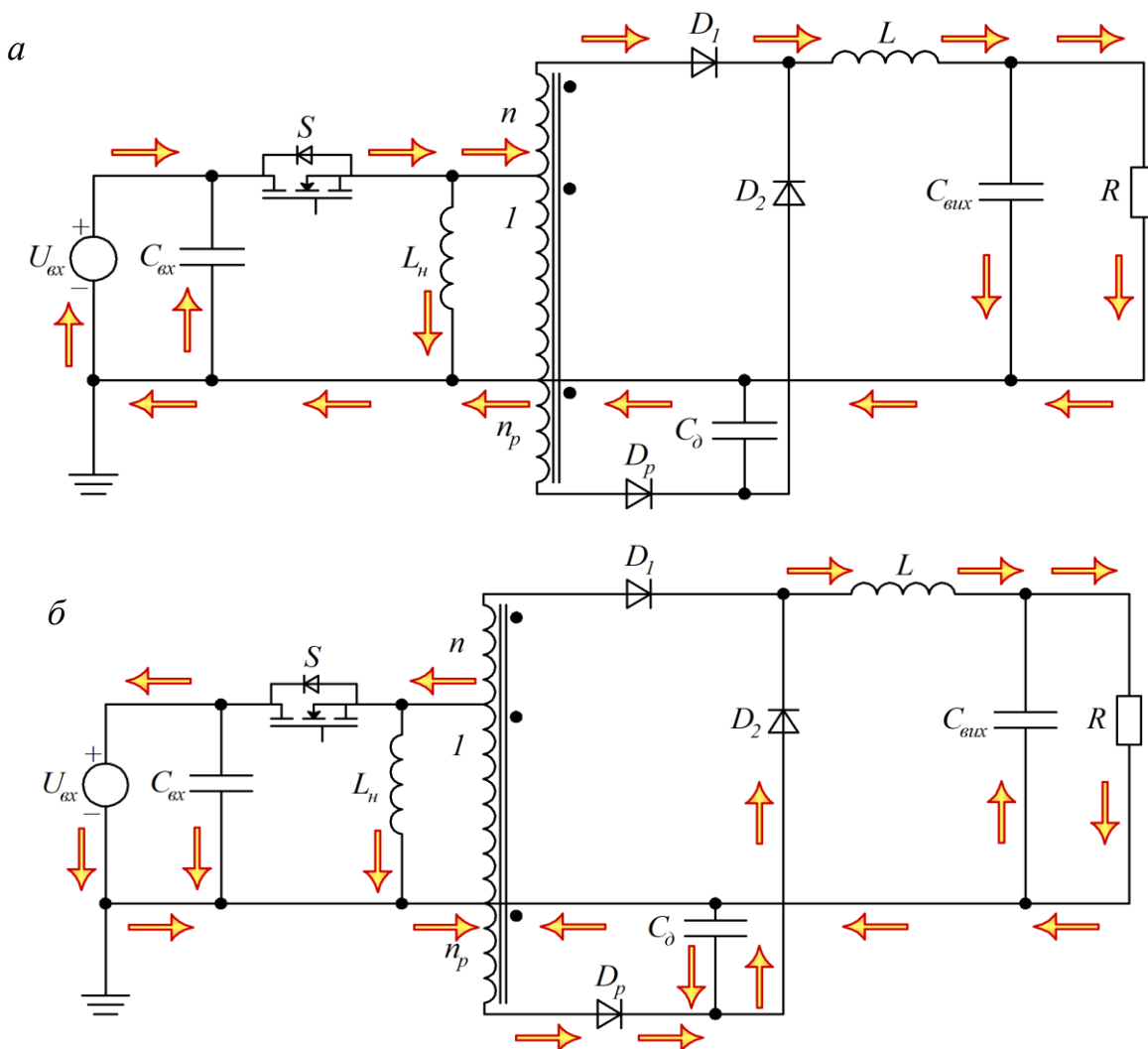


Рис. 5. Протікання струму в обох періодах перемикання S : a – вмикання; $б$ – вимикання

Під час вмикання частина струму, що передається в навантаження, надходить безпосередньо від джерела введення U_{ex} (пряма передача енергії), а інша частина магнітно обробляється автотрансформатором. У той час, коли перемикач S ввімкнений, індуктор вихідного фільтра L та індуктивність намагнічування автотрансформатора L_n накопичують енергію.

Під час вимикання індуктор вихідного фільтра L віддає накопичену енергію навантаження через діод D_2 . З іншого боку, індуктивність намагнічування автотрансформатора L_n віддає накопичену енергію допоміжному конденсатору C_d і вихідному фільтру через обмотку

розмагнічування, діод розмагнічування D_p і діод D_2 .

Вхідна напруга, вихідна напруга і напруга на допоміжному конденсаторі C_d подані відповідно як U_{ex} , $U_{вих}$ і U_{Cd} . Змінні I_L та I_{Ln} позначають струм через вихідну індуктивність L та індуктивність намагнічування L_n . Коефіцієнт витків автотрансформатора вторинно-первинної сторони позначається як n , а розмагнічувальної обмотки позначається як n_p . Режим провідності визначається струмом фільтра індуктора I_L . Значення робочого циклу – T . Для того щоб розрахувати передавальну функцію, виконується баланс вхідної-вихідної напруги за секунду.

$$\left[(1+n) \cdot U_{ex} - U_{вих} \right] \cdot T = (U_{вих} - U_{Cd}) \cdot (1-T); \quad (1)$$

$$U_{Cd} = \frac{n_p \cdot T}{1-T} \cdot U_{ex}; \quad (2)$$

$$\frac{U_{вих}}{U_{ex}} = (1+n+n_p) \cdot T. \quad (3)$$

Як видно, передавальна функція вихідної напруги аналогічна функції знижувального перетворювача, але множиться на $(1+n+n_p)$. Коефіцієнт підвищення напруги залежить від значення коефіцієнта трансформації автотрансформатора. Ці параметри також

впливають на перенапруги компонентів АПП. Отже, обидва параметри слід обирати ретельно, щоб мінімізувати перенапруги в компонентах перетворювача.

Під час роботи в АПП відбувається пряма передача енергії. Вихідна потужність визначається за виразом

$$\begin{aligned} P_{вих} &= U_{вих} \cdot I_{вих} = (1+n+n_p) \cdot T \cdot U_{ex} \cdot I_{вих} = \\ &= T \cdot U_{ex} \cdot I_{вих} + (n+n_p) \cdot T \cdot U_{ex} \cdot I_{вих} = P_n + P_m. \end{aligned} \quad (4)$$

З виразу (4) обчислюється співвідношення між потужністю, переданою магнітним полем P_m , і потужністю, переданою безпосередньо P_n :

$$\frac{P_m}{P_n} = n + n_p. \quad (5)$$

Отже, відсоткова частка прямої та магнітопереносної потужності зберігається постійною незалежно від вихідної потужності та співвідношення вихідної та вхідної напруги. Ці відсотки потужності залежать тільки від передавальних значень n і n_p . Цей факт відрізняється від інших

перетворювачів з послідовним з'єднанням, таких як послідовне зворотноеходове з'єднання, де чим вище відношення вихідної напруги до вхідної, тим нижче відсоток прямої потужності, що передається.

Відсоткові співвідношення P_n , P_m відносно вихідної потужності визначаються як

$$P_n = \frac{1}{1 + n + n_p} \cdot P_{вих}; \quad (6)$$

$$P_m = \frac{n + n_p}{1 + n + n_p} \cdot P_{вих}. \quad (7)$$

Отже, чим менше передавальне число, тим менший відсоток потужності, що магнітно обробляється автотрансформатором; для вищої ефективності бажані нижчі передавальні числа. Однак через те, що малі значення коефіцієнта трансформації передбачають високі навантаження за напругою і нижчий коефіцієнт підвищення напруги, для досягнення оптимальної конструкції має бути досягнутий компроміс між відсотком прямої передачі енергії, навантаженням за напругою та коефіцієнтом підвищення напруги.

Розрахунок генерованої потужності фотоелектричними панелями. Для розрахунку прийємо сонячну електростанцію середньої потужності на 100 кВт. В архітектурі DMPPT вибір центрального інвертора і фотоелектричної панелі має вирішальне значення. Відповідно до рис. 1 інвертор буде фіксувати напругу кола, тоді як залежно від характеристик фотоелектричної панелі коло буде складатися з різної кількості фотоелектричних панелей. Характеристики фотоелектричної панелі також дуже важливі для конструкції перетворювача постійного потоку. Як центральний інвертор можна використати FREESUN LVT FS0100 від Power

Electronics [30]. Для цього інвертора номінальна вхідна напруга становить 600 В, тому вона також буде напругою кола U_k . З іншого боку, обрано фотоелектричну панель SKJ60P6L від Siliken, здатну генерувати до 225 Вт [31].

Після того як напругу кола встановлено та вибрано фотоелектричні панелі, з'являється багато можливостей конфігурації фотоелектричних панелей. Вибране розподілення фотоелектричних панелей для сонячної електростанції середньої потужності складається в цілому з 450 фотоелектричних панелей, розподілених по 25 колах з 18 фотоелектричними панелями в кожному.

Як наведено на рис. 3, ефект тіні у фотоелектричній панелі змінює вольт-амперну характеристику фотогальванічних елементів, а також може різко знизити потужність, що виробляється фотоелектричною панеллю. Крім того, залежно від кількості та положення затінених панелей, а також відсотка затінення характеристики фотоелектричної панелі змінюватимуться.

У роботі розглянуто три варіанти затінення фотоелектричних панелей. У першому варіанті нема затінених фотоелектричних панелей, тому всі фотоелектричні панелі в колі генерують максимальну потужність. Для другого варіанта відсоток затінених фотоелектричних панелей становить 25 %, а третього варіанта – 30 %. Припускаючи, що всі фотоелектричні панелі генерують максимальну потужність, незалежно від стану затінення, встановлюються вхідна напруга та потужність перетворювача. Вихідна потужність перетворювача постійного струму в архітектурі DMPPT з послідовним з'єднанням, при якому напруга кола фіксується центральним інвертором, залежить від генерованої потужності фотоелектричних панелей, підключених до одного кола.

$$U_{вих_i} = U_{\kappa} \cdot \frac{P_{\phi_i}}{P_{\kappa}}, \quad (8)$$

де P_{κ} – потужність, що генерується всім колом;

P_{ϕ_i} – потужність, що генерується аналізованою фотоелектричною панеллю.

Ефект затінення передбачає зниження напруги і потужності точки максимальної потужності. Значення, отримані для фотоелектричної панелі залежно від відсоткового співвідношення затінених модулів, наведено в таблиці.

Таблиця

Ефект затінення фотоелектричної панелі

Параметр	Варіант панелі 1 (100 % / 0 %)		Варіант панелі 2 (75 % / 25 %)		Варіант панелі 3 (70 % / 30 %)	
	незатінена	затінена	незатінена	затінена	незатінена	затінена
Потужність $P_{вих}$, Вт	225	–	225	67,5	225	67,5
Вхідна напруга $U_{вх}$, В	29,3	–	29,3	15	29,3	15
Вихідна напруга $U_{вих}$, В	33,3	–	40,4	12,12	42,19	12,66
Струм кола I_{κ} , А	6,75	–	5,57	5,57	5,33	5,33

З таблиці вбачається, що, незалежно від топології перетворювача, чим вищий відсоток затінених фотоелектричних панелей, тим менша потужність може бути вироблена. Підвищення ефективності перетворювача означає, що на сонячній електростанції може бути вироблено більше енергії за рахунок використання АПП.

Основними особливостями пропонованого перетворювача є високий ККД і можливість як підвищувати, так і знижувати вихідну напругу відносно вхідної.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– перевагою архітектури фотоелектричних установок розподіленого відстеження максимальної потужності є те, що фотоелектричні панелі ізолюються одна

від одної, зменшуючи вплив негативних явищ на вироблення електроенергії, що, зокрема, позитивно впливає на застосування фотоелектричних елементів і дає змогу суттєво підвищити запас ходу електричного транспорту без заряджання його тягових акумуляторів від електромережі;

– основним компонентом топології прямоходового перетворювача є автотрансформатор, за рахунок чого підвищується ККД перетворювача, оскільки лише частина енергії обробляється магнітним способом;

– вихідна потужність прямоходового перетворювача постійного струму в архітектурі DMPPT з послідовним з'єднанням залежить від генерованої потужності фотоелектричних панелей, підключених до одного кола, з можливістю як підвищувати, так і знижувати вихідну напругу відносно вхідної.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).

Список використаних джерел

1. Сонячний транспорт. URL: <https://www.electra.com.ua/istochniki-elektoenergii/190-solnechnyj-transport.html>.
2. Sivapriyan R., Elangovan D., Kiran B., Madan R. Recent research trends in solar photovoltaic systems. *2020 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*. 2020. P. 215–220. DOI: 10.1109/ICDCS48716.2020.243584.
3. Khan A., Siddiki A., Rahman R. Solar PV system for self-consumption. *2022 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*. 2022. P. 1–8. DOI: 10.1109/IEMTRONICS55184.2022.9795847.
4. Keteng J. Photovoltaic optimal configuration of net zero energy building based on whole-process energy efficiency. *2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. 2022. P. 4842–4847. DOI: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846453.
5. Dobrea M., Bichiu S., Opris I., Vasluianu M. The energy efficiency of a prosumer in a photovoltaic system. *2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. 2020. P. 412–416. DOI: 10.1109/SIITME50350.2020.9292256.
6. Ge Z., Li X., Wang R., Yang T., Ding S. An investigation on maximum power region for distributed maximum power point tracking in PV systems. *2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS)*. 2022. P. 134–138. DOI: 10.1109/IC2ECS57645.2022.10088010.
7. Gharechahi A., Shahrezayi A., Hamzeh M., Afjei E. Increasing of harvested power in DMPPT-based PV systems by a new scan method. *2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*. 2022. P. 592–597. DOI: 10.1109/PEDSTC53976.2022.9767236.
8. Balato M., Liccardo A., Petrarca C. Dynamic Boost Based DMPPT Emulator. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 11. 2921. DOI: 10.3390/en13112921.
9. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1 (181). P. 103–110. DOI: 10.33271/nvngu/2021-1/103.
10. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Research of operating modes and features of integration of renewable energy sources into the electric power system. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 133–138. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969337.
11. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Adaptive modulation frequency selection system in power active filter. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 341–346. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969261.
12. Junglas S., Hubracht A., Maas J. Small and scalable high voltage push-pull converter for feeding dielectric elastomer transducers (DET). *International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications*. 2022. P. 170–173.
13. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 1. P. 87–91. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.276028.
14. Shavolkin O., Shvedchykova I. Improvement of the three-phase multifunctional converter of the photoelectric system with a storage battery for a local object with connection to a grid. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. 2020. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240789.
15. Choi J. S., Kim J. H., Rim C. T. Incidence solar power analysis of PV panels with curved reflectors. *2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Stanford, CA, USA, 2017. DOI: 10.1109/COMPEL.2017.8013320.

16. Choorakuzhiyil A., Parate K., Joshi J. Comparative analysis of maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. *2023 2nd International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*. 2023. DOI: 10.1109/INOCON57975.2023.10100994.
17. Javed M. R., Waleed A., Riaz M. T., Virk U. S., Ahmad S., Daniel K., Hussan U. A comparative study of maximum power point tracking techniques for solar systems. *2019 22nd International Multitopic Conference (INMIC)*. 2019. DOI: 10.1109/INMIC48123.2019.9022762.
18. Mirza W., Sheh H., Bashir S. Robust and optimal maximum power point tracking control of solar PV power system. *2020 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. 2020. DOI: 10.1109/iCoMET48670.2020.9074145.
19. Rajkumar M., Suresh K., Harinarayanan J. Photovoltaic fed flyback converters using improved perturb and observe algorithm. *2021 4th International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCT)*. 2021. P. 434–437. DOI: 10.1109/ICCCT53315.2021.9711760.
20. Mokhlis M., Ferfra M., Abbou A., Chraygane M. A distributed hybrid controller for photovoltaic panel under partial shading effect. *2020 9th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE)*. 2020. P. 76–81. DOI: 10.1109/ICPSE51196.2020.9354368.
21. Muliadi Sara I. A new method for finding the maximum point of the output power of a solar panel with multiple peaks. *2020 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICELTICs)*. 2020. DOI: 10.1109/ICELTICs50595.2020.9315389.
22. Wang Q., Yao W., Fang J., Xu M. Dynamic characteristics analysis of distributed PV plants with panel-level DC optimizers under severe partial shading conditions. *2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. 2022. P. 1909–1915. DOI: 10.1109/ACPEE53904.2022.9784079.
23. Barcellona S., Barresi M., Piegari L. MMC-based PV three-phase system with distributed MPPT. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2022. Vol. 37, No. 3. P. 1567–1578. DOI: 10.1109/TEC.2022.3167786.
24. Tripathi A., Ray S., Aruna M. Analysis on photovoltaic panel temperature under the influence of solar radiation and ambient temperature. *2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)*. 2021. DOI: 10.1109/ICAECT49130.2021.9392619.
25. Jahnvi B. P., Mathew R. K., Ashok S. Effect of shading on financial performance of solar photovoltaic system. *2022 1st International Conference on Sustainable Technology for Power and Energy Systems (STPES)*. 2022. DOI: 10.1109/STPES54845.2022.10006450.
26. Sheela A., Logeswaran T., Revathi S., Rajalakshmi K. Distributed MPPT configuration for improving solar energy production. *2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET)*. 2022. DOI: 10.1109/INCET54531.2022.9824131.
27. Kumar A. N., Prasad A. V., Ramesha M., Kumari T. S. The photovoltaic system step-up converter. *2021 5th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. 2021. P. 260–266. DOI: 10.1109/ICECA52323.2021.9676122.
28. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
29. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Sushko D., Syniavskyi A., Shelest D. Thermal-powerloss approximation method for determination of efficiency in semiconductor devices. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 456–461. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926756.

30. Lopez del Moral D., Barrado A., Sanz M., Lazaro A., Zumel P. Analysis and implementation of the buck-boost modified series forward converter applied to photovoltaic systems. *Solar Energy*. 2018. Vol. 176. P. 771–787. DOI: 10.1016/j.solener.2018.10.053.

31. Lopez del Moral D., Barrado A., Sanz M., Lazaro A., Fernandez C., Zumel P. Analysis and implementation of the autotransformer forward-flyback converter applied to photovoltaic systems. *Solar Energy*. 2019. Vol. 194. P. 995–1012. DOI: 10.1016/j.solener.2019.10.082.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01.

E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Hordiienko Denys Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Статтю прийнято 11.09.2023 р.

УДК 656.027.3

ОЦІНЮВАННЯ ПЕРСПЕКТИВ ВПРОВАДЖЕННЯ ШВИДКІСНОГО РУХУ НА ЗАЛІЗНИЧНИХ МАГІСТРАЛЯХ УКРАЇНИ

Кандидати техн. наук А. О. Ковальов, О. О. Шапатіна, канд. псих. наук К. В. Кім, магістранти І. П. Багмут, В. В. Валевська

ASSESSMENT OF PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF HIGH-SPEED TRAFFIC ON RAILWAYS OF UKRAINE

PhD (Tech.) A. O. Kovalov, PhD (Tech.) O. O. Shapatina, PhD (Psych.) K. V. Kim, master I. P. Bahmut, master V.V. Valevska

Анотація. Світовий досвід показує, що швидкісний рух є основою конкурентоспроможності залізничного транспорту. Відповідно до цього в статті розглядаються питання щодо перспектив впровадження швидкісного руху на магістралях України.

На першому етапі виконується обґрунтування вибору виду транспорту на основі положень теорії нечітких множин, що дає можливість визначити найбільш конкурентоспроможний вид транспорту.

На другому етапі комплексно оцінюються перспективи впровадження швидкісного руху, що визначило необхідність оцінювання економічної ефективності цього виду транспорту з урахуванням реконструкції існуючих залізничних магістралей України.

Ключові слова: швидкісний рух, залізничний транспорт, теорія нечітких множин, економічна ефективність.

Abstract. *The development of Ukraine's economy and industry largely depends on the use of its transit potential, which will contribute not only to the intensification of transit cargo flows, but also to an increase in passenger traffic.*

Even in the conditions of martial law, railway transport performs its functions of mass transportation of goods and passengers rather stably. However, the efficiency of railway transport is mainly provided by freight transport, which makes it much more difficult to compete with other modes of transport in the field of passenger transport.

In today's realities on the market of transport services regarding the provision of passenger transportation, there is a decline in the position of railway transport

But, despite this, railway transport remains strategically important, as it ensures the transportation of goods and the evacuation of the population in difficult times for our country. In addition, the railway network of Ukraine organically fits into the European network through Poland, Moldova, Hungary, Romania and Slovakia. All this determines that the process of European integration of Ukraine requires modern approaches from the railway, one of which is the introduction of high-speed traffic.

As world experience shows, the introduction of high-speed traffic is necessary to increase the efficiency of railway passenger transportation and attract customers to railway services. In accordance with this, the article discusses the prospects for the introduction of high-speed traffic on the highways of Ukraine.

At the first stage, the justification of the choice of the mode of transport is carried out based on the provisions of the theory of fuzzy sets, which makes it possible to determine the most competitive mode of transport.

At the second stage, a comprehensive assessment of the prospects for the introduction of high-speed traffic is carried out, which determined the need to assess the economic efficiency of this type of transport, taking into account the reconstruction of the existing railway lines of Ukraine.

Therefore, the introduction of high-speed traffic will allow to strengthen the competitive advantages of railway transport in the field of passenger transportation, and will also contribute to the European integration processes in Ukraine.

Keywords: *high-speed traffic, railway transport, theory of fuzzy sets, economic efficiency.*

Вступ. Розвиток економіки і промисловості України значною мірою залежить від використання її транзитного потенціалу, що сприятиме не тільки забезпеченню інтенсифікації обсягів транзитних вантажопотоків, а й збільшенню пасажиропотоку.

Навіть в умовах воєнного стану залізничний транспорт досить стабільно виконує свої функції щодо масового перевезення вантажів і пасажирів. Однак ефективність залізничного транспорту переважно забезпечується за рахунок вантажних перевезень, що значно ускладнює конкурування з іншими видами транспорту у сфері пасажирських перевезень.

Як показує світовий досвід, для підвищення ефективності залізничних пасажирських перевезень і залучення клієнтів до послуг залізниць необхідне впровадження швидкісного руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних реаліях на ринку транспортних послуг щодо забезпечення пасажирських перевезень спостерігається падіння позицій залізничного транспорту (рис. 1).

Але, незважаючи на це, залізничний транспорт залишається стратегічно важливим, оскільки забезпечує перевезення вантажів та евакуацію населення у складні для нашої країни часи. Крім того, залізнична мережа України органічно

вписується в європейську мережу через Польщу, Молдову, Угорщину, Румунію та Словаччину. Усе це означає, що процес

євроінтеграції України потребує від залізниці сучасних підходів, одним з яких є запровадження швидкісного руху [1–3].

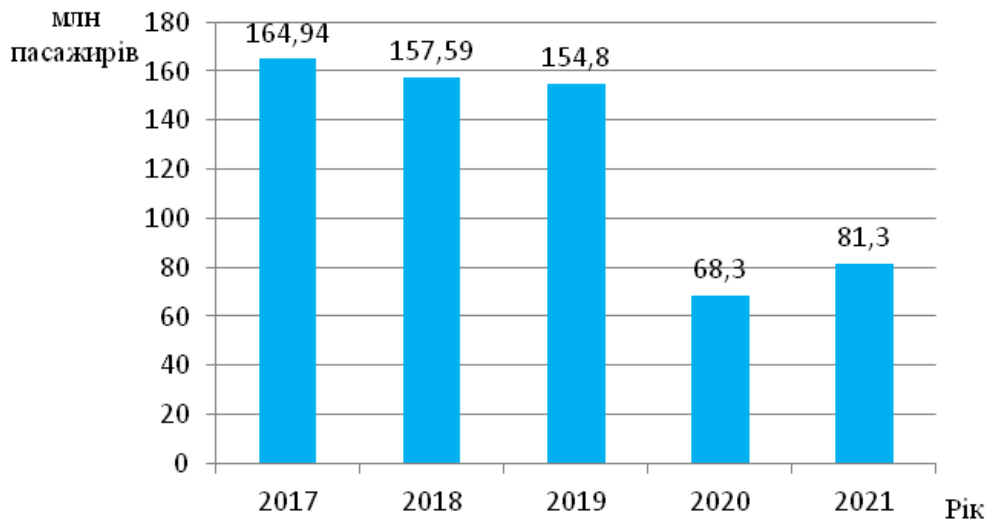


Рис. 1. Кількість перевезених пасажирів АТ УЗ у 2017-2021 рр.

Досвід таких країн, як Японія та Іспанія, показує ефективність виконання швидкісного руху на окремих магістралях, незалежних від решти залізничної мережі. А у Франції високошвидкісна магістраль є продовженням загальної залізничної колії, тоді як у Німеччині та Італії передбачається реконструкція існуючих колій. Це означає, що для України на підставі світового досвіду необхідно обрати свій варіант реконструкції залізниць під швидкісний рух [4].

Україна має досвід щодо впровадження швидкісного руху. Так, у 2012 р. до ЄВРО-2012 було забезпечено залізничне сполучення між містами-учасниками змагань, де курсували поїзди корейського виробництва [5, 6].

Отже, перспективи залізничних пасажирських перевезень необхідно пов'язувати саме з розвитком і впровадженням швидкісних і високошвидкісних магістралей, використовуючи досвід розвинутих країн Європи та Азії [7]. Крім того, швидкісний залізничний транспорт дає змогу зменшити

вплив на довкілля, забезпечуючи конкурентоспроможність залізничного транспорту порівняно з автомобільним та авіаційним [8, 9].

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень у цьому напрямі, залишаються не повною мірою розкритими питання щодо перспектив та економічної ефективності організації швидкісного руху в Україні.

Мета та завдання дослідження.

Мета роботи полягає в оцінюванні перспектив впровадження швидкісного руху на основі використання положень теорії нечітких множин щодо вибору виду транспорту і визначення економічної ефективності організації швидкісного руху на залізничних магістралях України.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити чинники, що впливають на вибір транспорту, і провести необхідні розрахунки на основі положень теорії нечітких множин;
- визначити взаємозв'язок між експлуатаційними та капітальними

показниками витрат на реконструювання залізниць, що дадуть змогу обґрунтувати доцільність введення швидкісного руху;

- встановити оптимальну кількість швидкісних поїздів, що забезпечують ефективність перевезень.

Основна частина дослідження. За даними Державної служби статистики України [10], за кількістю перевезених пасажирів у 2021 р. залізничний транспорт посідає друге місце, поступаючись автомобільному (рис. 2).

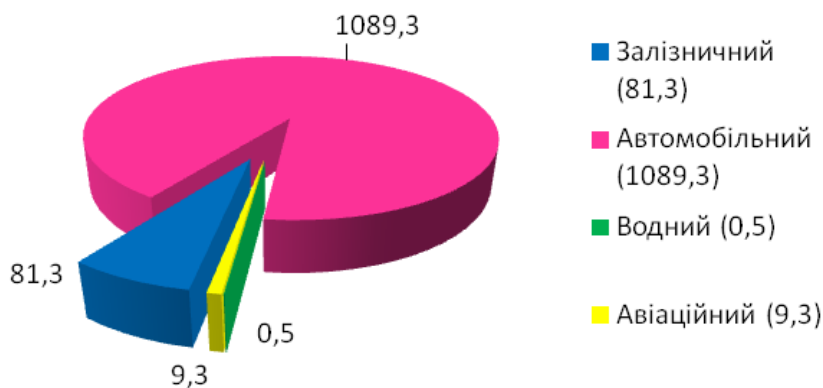


Рис. 2. Кількість перевезених пасажирів за видами транспорту у 2021 р. (млн пас)

В умовах конкуренції видів транспорту перевагу надають тому, що відповідає найбільшій кількості вимог. За умови багатфакторності чинників, а саме вартість перевезення, час у дорозі, надійність перевезення, частота відправлень, комфортність і ще багато чинників, що враховуються одночасно,

доцільно для прийняття рішення використовувати положення теорії нечітких множин [11].

Нехай існує множина з i альтернатив (вибір транспорту) $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$. Як критерій вибору оптимальної альтернативи використовуємо критерій B , поданий у вигляді нечіткої множини

$$B = \left\{ \frac{\mu_c(a_1)}{a_1}, \frac{\mu_c(a_2)}{a_2}, \dots, \frac{\mu_c(a_i)}{a_i} \right\}, \quad (1)$$

де $\mu_c(a_i)$ – функція приналежності a_i за критерієм B , що характеризує ступінь відповідності альтернативи поняттю.

Процедуру вибору оптимального варіанта запишемо у вигляді перетину нечітких множин

$$P = B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n. \quad (2)$$

Операції перетину нечітких множин відповідає мінімум, що виконується над їхніми функціями приналежності. Тоді як

оптимальна альтернатива обирається a , що має найбільше значення функції приналежності.

Проілюструємо вибір виду транспорту для забезпечення пасажирських перевезень на підставі таких чинників, як вартість перевезення (B_1), час у дорозі (B_2), частота відправлень (B_3), дотримання графіка руху (B_4), можливість забезпечення перевезення на різні відстані (B_5), комфортність (B_6). Дані таблиці наведено за роботами [2, 12].

Оцінювання видів транспорту за даними експертів

Вид транспорту	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
a_1 – автомобільний	4	2	2	2	4	3
a_2 – залізничний	2	3	4	4	2	3
a_3 – повітряний	5	1	3	1	3	2
a_4 – залізничний швидкісний	3	2	2	1	3	2

За даними експертів для чотирьох видів транспорту a_i , $i = \overline{1,4}$ у таблиці наведені оцінки [13]:

- 1 – вища оцінка (1);
- 2 – добра оцінка (0,9);
- 3 – достатньо добра (0,8);

4 – задовільна (0,7);

5 – майже задовільна (0,6).

Сформовано критерії, що характеризують ступінь приналежності виду транспорту:

$$B_1 = \left\{ \frac{0,7}{a_1}; \frac{0,9}{a_2}; \frac{0,6}{a_3}; \frac{0,8}{a_4} \right\};$$

$$B_2 = \left\{ \frac{0,9}{a_1}; \frac{0,8}{a_2}; \frac{1,0}{a_3}; \frac{0,9}{a_4} \right\};$$

$$B_3 = \left\{ \frac{0,9}{a_1}; \frac{0,7}{a_2}; \frac{0,8}{a_3}; \frac{0,9}{a_4} \right\};$$

$$B_4 = \left\{ \frac{0,9}{a_1}; \frac{0,7}{a_2}; \frac{1,0}{a_3}; \frac{1,0}{a_4} \right\};$$

$$B_5 = \left\{ \frac{0,7}{a_1}; \frac{0,9}{a_2}; \frac{0,8}{a_3}; \frac{0,8}{a_4} \right\};$$

$$B_6 = \left\{ \frac{0,8}{a_1}; \frac{0,8}{a_2}; \frac{0,9}{a_3}; \frac{0,9}{a_4} \right\}.$$

На підставі цього знаходимо відповідні мінімальні значення, з яких обираємо максимальне.

$$P = \max \left\{ \begin{array}{l} \min(0,7; 0,9; 0,9; 0,9; 0,7; 0,8); \min(0,9; 0,8; 0,7; 0,7; 0,9; 0,8); \\ \min(0,6; 1,0; 0,8; 1,0; 0,8; 0,9); \min(0,8; 0,9; 0,9; 1,0; 0,8; 0,9) \end{array} \right\} = \\ = \max(0,7; 0,7; 0,6; 0,8).$$

Тобто оптимально альтернативою з чотирьох є швидкісний залізничний транспорт.

$$a_4 = (0,8;0,9;0,9;1,0;0,8;0,9).$$

Для комплексного прийняття рішення необхідно визначитися щодо ефективності впровадження швидкісного руху з урахуванням співвідношення експлуатаційних і капітальних витрат.

Задля оцінювання оптимального способу організації швидкісного пасажирського руху порівнюємо та оберемо варіант, що забезпечує мінімальний рівень експлуатаційних і капітальних витрат [2].

Ефект від впровадження швидкісного руху забезпечує скорочення часу на перевезення пасажирів.

Так, має виконуватися умова

$$C_{\text{бш}} \cdot t \geq C_p + C_{\text{шв}} \cdot t, \quad (3)$$

де $C_{\text{бш}}$ – річні експлуатаційні витрати без швидкісного руху, грн;

C_p – вартість реконструкції лінії, грн;

$C_{\text{шв}}$ – річні витрати при введенні швидкісного руху, грн;

t – нормативний термін окупності, р.

Скориставшись системою укрупнених норм, знайдемо річні експлуатаційні витрати при безшвидкісному русі як

$$C_{\text{бш}} = 365 (n_B C_B (1 + \kappa) + 2n_{\text{ПС}} (C_{\text{ПС}} + C_O^{\text{ПС}})), \quad (4)$$

де n_B – кількість вантажних поїздів, поїзд;

C_B – витрати з пересування одного вантажного поїзда, грн;

κ – коефіцієнт нерівномірності руху за напрямками;

$n_{\text{ПС}}$ – кількість поїздів, що прямують зі звичайними швидкостями, поїзд;

$C_{\text{ПС}}$ – витрати з пересування одного пасажирського поїзда, грн;

$C_O^{\text{ПС}}$ – витрати, пов'язані з обгоном вантажних поїздів пасажирськими поїздами, грн.

Річні експлуатаційні витрати при впровадженні швидкісного руху визначаються як

$$C_p = 365 (n_B C_B (1 + \kappa) + 2n_{\text{Ш}} C_{\text{Ш}} + 2(n_0 - n_{\text{Ш}}) (C_O^{\text{ПС}} + C_O^{\text{Ш}})), \quad (5)$$

де $C_{\text{Ш}}$ – витрати з пересування одного швидкісного поїзда, грн;

$n_{\text{Ш}}$ – кількість швидкісних поїздів, поїзд;

n_0 – загальна кількість пасажирських поїздів включно зі швидкісними та поїздами, що прямують зі звичайними швидкостями, поїзд;

$C_O^{\text{Ш}}$ – витрати, пов'язані з обгоном вантажних поїздів швидкісними поїздами, грн.

Витрати з пересування поїздів розраховуються за укрупненими нормами

$$C_i = C_{\text{нкм}(i)} l, \quad (6)$$

де $C_{\text{нкм}(i)}$ – вартість одного поїздо-кілометра i -го поїзда, грн;

l – довжина лінії, км.

Кількість вантажних поїздів (пар поїздів/доба) визначається так:

- до реконструкції

$$n_B = N_{\text{max}} \lambda - \beta_{\text{ПС}} n_0; \quad (7)$$

- після реконструкції та введення швидкісного руху

$$n_B = N_{\text{MAX}} \lambda - \beta_{\text{Ш}} n_{\text{Ш}} - \beta_{\text{ПС}} (n_0 - n_{\text{Ш}}), \quad (8)$$

де N_{max} – максимальна пропускна спроможність, поїзд/доба;

λ – коефіцієнт, що враховує технологічні перерви в русі та необхідний резерв для забезпечення коливань розмірів руху поїздів;

$\beta_{ПС}, \beta_{Ш}$ – коефіцієнти, що враховують знімання пасажирських і швидкісних поїздів.

Тоді витрати, пов'язані з обгоном вантажних поїздів, визначаються як

$$C_O^{ПС} = t_{СТ} C_{ПГ}^B \frac{2l(n_0 - n_{Ш})}{J_B} \left(\frac{1}{V_B} - \frac{1}{V_{ПС}} \right) \quad (9)$$

і

$$C_O^{Ш} = t_{СТ} C_{ПГ}^B \frac{2l \cdot n_{Ш}}{J_B} \left(\frac{1}{V_B} - \frac{1}{V_{Ш}} \right), \quad (10)$$

де $t_{СТ}$ – час стоянки вантажного поїзда під обгоном, год;

$C_{ПГ}^B$ – вартість поїздо-години вантажного поїзда, грн;

J_B – міжпоїзний інтервал, год;

V_B – швидкість вантажних поїздів, км/год;

$V_{ПС}$ – швидкість пасажирських поїздів, км/год;

$V_{Ш}$ – швидкість швидкісних поїздів, км/год.

Підставляючи формули (4)-(10) у вираз (3), можна визначити економічно раціональну кількість швидкісних поїздів, при якій забезпечується ефективність використання капітальних вкладень у реконструкцію колії:

$$n_{Ш} \geq \frac{C_p + (C_{ув} - C_{бу})t}{365(\Delta\beta(1 + \kappa)C_B + 2(C_{ПС} - C_{Ш}) - t_{СТ} C_{ПГ}^B \frac{2l}{J_B} \left(\frac{1}{V_{ПС}} - \frac{1}{V_{Ш}} \right))t} \quad (11)$$

Одним із основних показників, що впливає на ефективність впровадження швидкісного руху, є вартість пасажиро-години. Так, для швидкісного руху при збереженні постійної вартості пасажиро-години відбувається зменшення вартості одного поїздо-кілометра, що призводить до збільшення ефективності капітальних вкладень за умови постійного співвідношення швидкостей пасажирських і вантажних поїздів.

Як розрахунковий приклад прийнято такі вихідні дані: маса вантажного поїзда $Q = 4000$ т, пасажирського $Q = 1200$ т, довжина лінії $l = 350$ км, $V_B = 55$ км/год,

$V_{ПС} = 100$ км/год, $V_{Ш} = 160$ км/год, коефіцієнт нерівномірності руху за напрямками $\kappa = 0,8$. Вартості одного поїздо-кілометра визначені при середній заселеності поїзда 900 пас (15-вагонний склад). Пасажиропотік – 30 тис. пасажирів на добу.

На підставі цих даних за формулою (11) побудовані залежності кількості швидкісних поїздів від вартості поїздо-кілометра і середньої вартості реконструкції 1 км колії [3], а також середньої вартості реконструкції 1 км колії від вартості поїздо-кілометра для відповідної кількості швидкісних поїздів (рис. 3, 4).

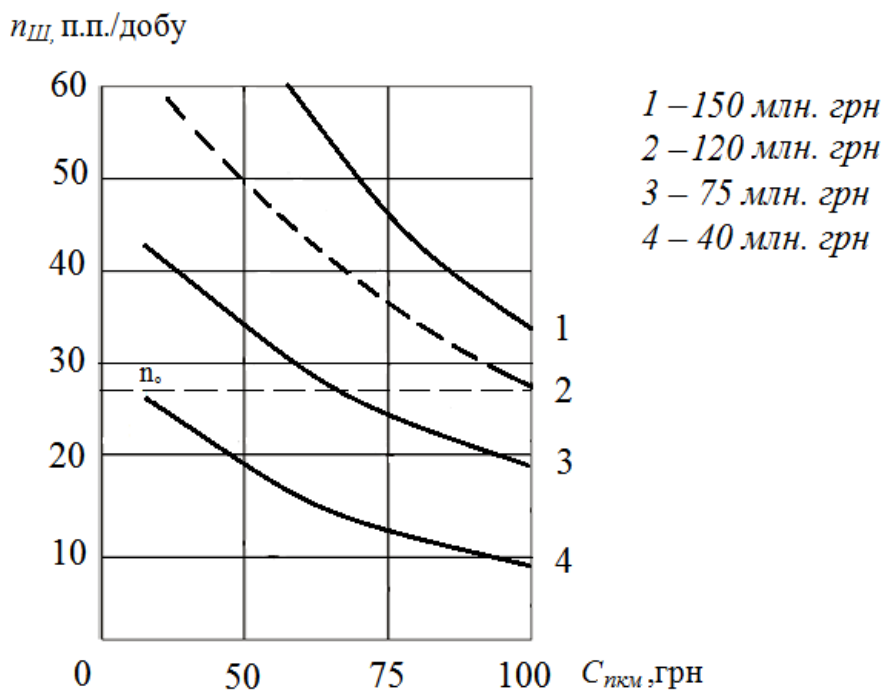


Рис. 3 Залежність кількості швидкісних поїздів від вартості поїздо-кілометра і середньої вартості реконструкції 1 км колії

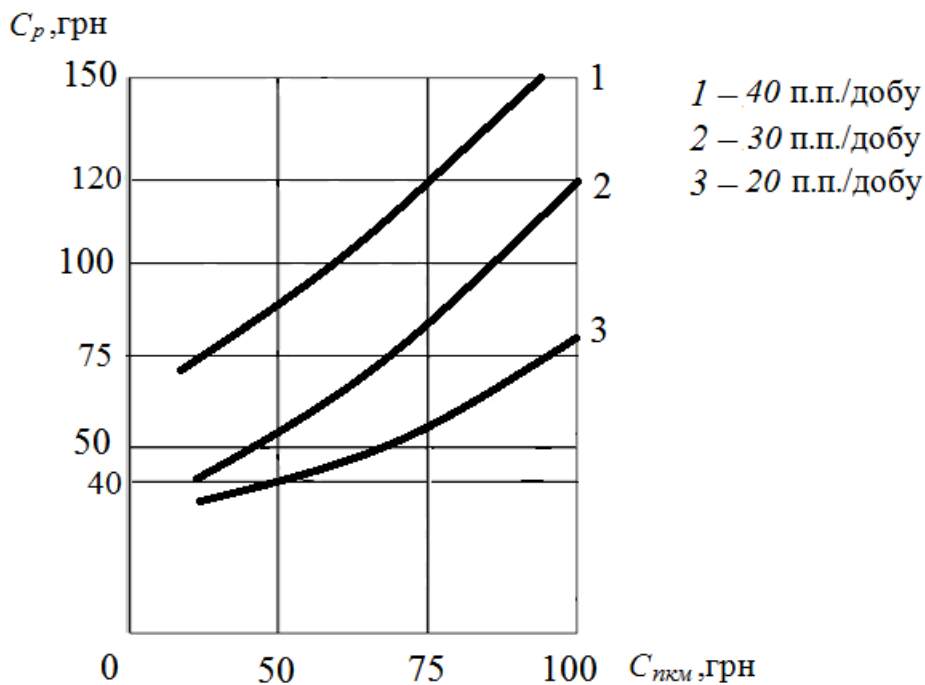


Рис. 4. Залежність середньої вартості реконструкції 1 км колії від вартості поїздо-кілометра для відповідної кількості швидкісних поїздів

Отже, отримуємо, що на раціональну кількість швидкісних поїздів основний вплив мають вартість реконструкції колії та вартість одного поїздо-кілометра. Також зазначимо, що підвищення пасажиропотоку потребує збільшення витрат на реконструкцію. Так, при 40 парах поїздів на добу при однаковій вартості поїздо-кілометра витрати на реконструкцію будуть вище, ніж при 30 парах поїздів.

Було встановлено, що при зміні вихідних даних характер залежності раціональної кількості швидкісних поїздів від вартості поїздо-кілометра і середньої вартості реконструкції 1 км колії не змінюється.

Висновки

1. Визначено чинники, що впливають на вибір транспорту, і проведено розрахунки на основі положень теорії нечітких множин, що підтверджують перспективність впровадження

швидкісного залізничного транспорту на магістралях України.

2. На підставі проведеного дослідження виявлено кількісні значення у взаємозв'язку між експлуатаційними та капітальними показниками витрат на реконструювання залізниць, що дають змогу обґрунтувати доцільність введення швидкісного руху.

3. Визначено, що зменшення вартості поїздо-кілометра призводить до зменшення капітальних вкладень. Визначено, що при пропусканні пасажиропотоку в розмірі близько 30 пар поїздів на добу при вартості поїздо-кілометра 100 введення швидкісного пасажирського руху буде доцільно при середній вартості реконструкції одного кілометра 120 млн грн і менше.

Отже, впровадження швидкісного руху дасть змогу посилити конкурентні переваги залізничного транспорту у сфері пасажирських перевезень, а також сприятиме євроінтеграційним процесам в Україні.

Список використаних джерел

1. Кірпа Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України в Європейську транспортну систему: монографія. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2004. 248 с.
2. Бараш Ю. С., Покотілов А. А., Чаркіна Т. Ю. Теоретико-методичний підхід до визначення конкурентоспроможності послуг, що надаються пасажирськими видами транспорту. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2011. Вип. 38. С. 233-237.
3. Бараш Ю. С., Момот А. В. Удосконалена методика визначення економічної ефективності будівництва та експлуатації високошвидкісної магістралі в Україні. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2013. Вип. 6. С. 7-24.
4. Cheng Y., Loo Becky P.Y., Vickerman R. High-speed rail networks, economic integration and regional specialization in China and Europe. *Travel Behaviour and Society*. Vol. 2, Is. 1. January 2015. P. 1-14.
5. Концепція впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів на залізницях України в 2004-2015 роках. Державна адміністрація залізничного транспорту України. Київ, 2004. 43 с.
6. Аналіз перспектив впровадження високошвидкісного руху в Україні / О. В. Лаврухін, О. О. Шапатіна, С. В. Газаєв та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 163. С. 4-10.

7. Курган М. Б., Курган Д. М. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні: монографія / Дніпр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро, 2016. 283 с.
8. Lei W. High-speed rail services development and regional accessibility restructuring in megaregions: A case of the Yangtze River Delta, China Transport Policy. 2018. Vol. 72. P. 34–44.
9. Wan Y., Hun-Koo H., Yoshida Y., Zhang A. Airlines' reaction to high-speed rail entries: Empirical study of the Northeast Asian market. Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2016. Vol. 94. P. 532-557.
10. Державна служба статистики України. Кількість перевезених пасажирів за видами транспорту. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 04.09.2023).
11. Kondratenko G., Kondratenko Y., Sidenko I. Fuzzy Decision Making System for Model-Oriented Academia/Industry Cooperation: University Preferences. In: C. Berger-Vachon (ed.), Complex Systems: Solutions and Challenges in Economics, Management and Engineering 125. 2018. P. 109–124.
12. Кислий В. М., Біловодська О. А., Олефіренко О. М., Соляник О. М. Логістика: Теорія та практика: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2010. 360 с.
13. Шапочка М. К., Макарюк О. В. Застосування експертних оцінок при прийнятті рішень за умов невизначеності. *Механізм регулювання економіки*. 2006. № 4. С. 142-148.

Ковальов Антон Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0001-8546-3183. Тел.: +38 (096)4106726. E-mail: kovalovanton1979@gmail.com.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-9185-6212. Тел.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Кім Катерина Володимирівна, кандидат психологічних наук, доцент кафедри правового забезпечення та адміністрування транспортної діяльності. ORCID ID: 0000-0002-5231-2554. Тел.: +38 (067)7096003. E-mail: katerinkim72@gmail.com.

Багмут Ірина Петрівна, магістрант групи 217-ОПУТ-322, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (063)4872011. E-mail: bagmut@kart.edu.ua.

Валевська Вікторія Валеріївна, магістрант групи 217-ОПУТ-322, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (096)4097505. E-mail: vikulylitvinchuk.79@gmail.com.

Kovalov Anton Oleksandrovich, PhD (Tech), associate professor of department of management of freight and commercial work, Ukrainian state university of railway transport. ORCID ID: 0000-0001-8546-3183. Tel.: +38 (096)4106726. E-mail: kovalovanton1979@gmail.com.

Shapatina Olha Oleksandrivna, PhD (Tech), associate professor of department of management of freight and commercial work, Ukrainian state university of railway transport. ORCID ID: 0000-0002-9185-6212. Tel.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Kim Kateryna Volodymyrivna, PhD (Psych.), associate professor of department of legal support and administration of transport activities. ORCID ID: 0000-0002-5231-2554. Tel.: +38 (067)7096003. E-mail: katerinkim72@gmail.com.

Bahmut Iryna Petrivna, master of a group 217-ОПУТ-322, Ukrainian state university of railway transport. Tel.: +38 (063)4872011. E-mail: bagmut@kart.edu.ua.

Valevska Viktoriia Valeriivna, master of a group 217-ОПУТ-322, Ukrainian state university of railway transport. Tel.: +38 (096)4097505. E-mail: vikulylitvinchuk.79@gmail.com.

Статтю прийнято 15.09.2023 р.

UDC 656.025.4

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF CARGO TRANSPORTATION
IN INTERNATIONAL COMMUNICATION THROUGH LAND BORDER CROSSINGS
IN UKRAINE**

PhD (Tech.) Ju. Shuldiner, PhD (Tech.) H. Prymachenko, master G. S. Pashenko

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ
У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ ЧЕРЕЗ СУХОПУТНІ ПРИКОРДОННІ
ПЕРЕХОДИ УКРАЇНИ**

Кандидати техн. наук Ю. В. Шульдінер, Г. О. Примаченко, магістрант Г. С. Пащенко

***Abstract.** We analyze the possibility of increasing the international cargo transportation, volumes in Ukraine through wider introduction of container transportation and optimization of border crossings at the state border in the article. The development efficiency of a new container transportation direction and the most probable routes of container trains are identified. The volumes of container transportation over the past 10-20 years are compared. Proposals about the restoration of some checkpoints and the opening of new international cargo transportation hubs are substantiated. Proposed routes will change those that lost their relevance due to the war. In addition, they will carry out a function of redistribution of cargo flows from the Ukrainian seaports to Europe.*

***Keywords:** container, terminal, checkpoint, seaport, gauge, cargo flows, designing, railway junction.*

***Анотація.** У статті проаналізовано можливості збільшення обсягів міжнародних перевезень в Україні шляхом широкого впровадження контейнерних перевезень та оптимізації роботи пунктів пропускання на державному кордоні. Розглянуто ефективність розвитку нового напрямку прямування вантажів у контейнерах і визначено найбільш імовірні маршрути контейнерних поїздів. Зроблено порівняння обсягів перевезення контейнерів за останні 10-20 років. Обґрунтовано пропозиції з відновлення деяких пунктів пропускання та відкриття нових транспортних хабів для вантажів у міжнародному сполученні. Запропоновані маршрути прийдуть на заміну тим, що втратили актуальність у зв'язку з війною. Крім того, їхньою функцією також буде перерозподіл вантажопотоків із портів України до Європи. Встановлено, що розвиток напрямку вантажопотоку через Ягодин є актуальним та економічно доцільним на сьогодні за рахунок збільшення швидкості пересування вантажів. Доведено, що найбільш ефективним способом використання універсальної тари для перевезень різними видами транспорту і залізничним рухомим складом з візками для різної ширини колії є застосування контейнерів. Тому встановлено необхідність створення терміналу поблизу станції Ягодин як найближчого до морських портів Центральної Європи переходу через кордон України. За результатами дослідження, найкоротші відстані між найбільш імовірними пунктами курсування контейнеропотоків пролягають у більшості випадках через Ягодин, що доводить оптимальність побудови маршрутів переміщення вантажів у контейнерах. Розглянуто можливість відкриття нових прикордонних переходів на заході країни, які б розвантажили існуючі та дали змогу збільшити швидкість пересування вантажів через кордон. Розвиток цього напрямку*

організації руху міжнародних вантажопотоків за участю залізничного транспорту допоможе розвантажити існуючі залізничні магістралі і матиме стратегічне значення для України.

Ключові слова: контейнер, термінал, пункт пропускання, порт, ширина колії, вантажопотік, проектування, залізничний вузол.

Introduction. Ukraine and Ukrainians in 2022 had to live through a number of radical changes that have affected all spheres of life. They needed to search for new ways of working and development of the State including of course transportation due to the war. Before the war international cargo transportation in Ukraine was mostly provided by maritime transport [1]. This has suffered complications because of the Seaports blockage, so the workload of land border crossings increased. The «Grain corridors» partially allowed a resolution of the issue of the seaports' usage. However, the threat of interruptions to their work remains, so it is necessary to develop new schemes for opportunities to quickly redirect cargo flows to European countries and to have constant readiness at border crossings to process the appropriate volumes of cargo.

Recent research and publications analysis. International cargo transportation in Ukraine and developed countries in the world is provided by containers. At the same time the development of railway infrastructure in our country primarily aims to increase cargo transportation using normal rolling stock [2, 3]. Many experts from the leading countries around the world have noted repeatedly the efficiency of container transportation. These are some of the benefits [4]:

- Adaptation to rapid loading, unloading and transshipment between different means of transport;
- Increase in the cargo delivery speed;
- Safety and security of cargo in containers;
- Lower cost of usage compared to usual packing;
- Simplicity of container transportation management.

In addition to the physical building of the infrastructure, it is necessary to consider legislative aspects. There are a rather limited number of documents related to container transportation in Ukraine [5]. However, work in this area is progressing. An example is the adoption of the Law of Ukraine «On multimodal transportation» [6]. This document improves the existing legal framework, and introduces legal schemes for wider use of multimodal/container cargo transportation in the Ukrainian transportation system. This, in turn, will contribute to the environmental protection through the reorientation of most of the cargo transportation, from roads to maritime and other more ecological means of transport. In addition, there will be optimized time and cost of cargo delivery by implementing a single multimodal transportation contract.

There are scientists who have researched this topic: Y. Alyoshynsky, M. Andriyenko, T. Butko, L. Vismans, V. Vozniuk, D. Lomotko, N. Piddubna, K. Pluzhnikov, M. Postan, G. Prokudin, O. Tymoshchuk, S. Khamadi, O. Kharchuk etc. In the article by Y. Alyoshynsky «Organizational principles of multimodal transportation planning» the author noted that the choice of the route depends both on the availability of the railway network and the location of the main cargo terminals, as well as on the cost of transportation by possible options. In addition, the container unit is selected depending on the type of the cargo and the volume of transportation [7]. T. Butko in her publication «Improvement of the organization of interaction between railway junctions and ports in container transportation» wrote that in 2018 the main volume of container transportation is provided by railway and maritime transport, while the same

transportation by cars is much faster, but twice or even three times more expensive [8]. In the article of D. Lomotko «Issues of the formation of a modern container system on the Ukrainian railways based on logistics principles» it was noted the necessity of the creation of modern container logistics centers in Ukraine [9]. But in all these researches the main advantage is given to maritime transport, routes of which are currently partially blocked. Therefore, it is necessary to note the possibilities of using land border crossings.

Research purpose and objective. The purpose of this article is to study the possibilities of increasing the efficiency of international cargo transportation as one of the most important directions of maintaining the economy of Ukraine during the war, and the state restoration after its end. One of the most appropriate opportunities is within container transportation, so it is necessary to analyze its current state in Ukraine and future development. It is also necessary to note the state of the infrastructure for cargo (container) transportation at the international borders, and the improvement program in the most promising and currently underdeveloped regions.

Main part of the research. Cargo transportation operators have to look for the most convenient and efficient way of transporting goods in the face of rapidly increasing volumes of cargo. As a result,

containers have become more and more popular. According to the data of the container market, the volume of container traffic increased almost 4 times during the past 24 years [10].

Nowadays, the average annual growth in this sector by volume is approximately 3-4 %, the same rates are predicted until 2025 [11]. It is important to note that most of the world's container transportation is provided by maritime transport. This is explained by the need for mass of cargo and they are carried out because of specialties by both mean of transport and package.

The development of container transportation in Ukraine became noticeable in the 2010s. This is due to both historical reasons (cargo transportation carried out mostly according to the principles of Soviet times) and the focus on the CIS countries (low containerization rates). Long-awaited changes started after the redirection of mass cargo. Annual growth of volumes of containers, transported by railway, reached 10-11 % starting from 2016 (Fig. 1, 2).

In addition, Ukrainian Railways has its own department, which carries out organization of container intermodal transportation, called «CTS «Liski». There were 22 routes for container and counter-trailer trains in the directions «North-South» and «East-West» before the war.

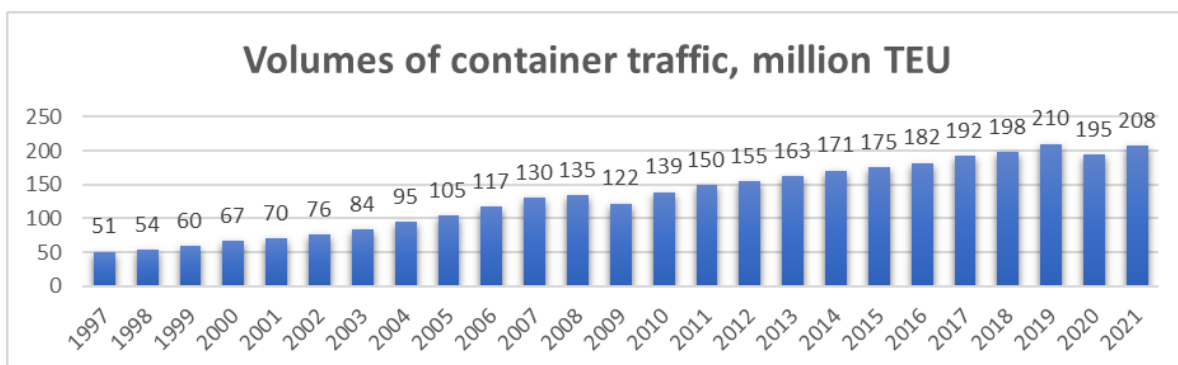


Fig. 1. Increase in container traffic (1997-2021)

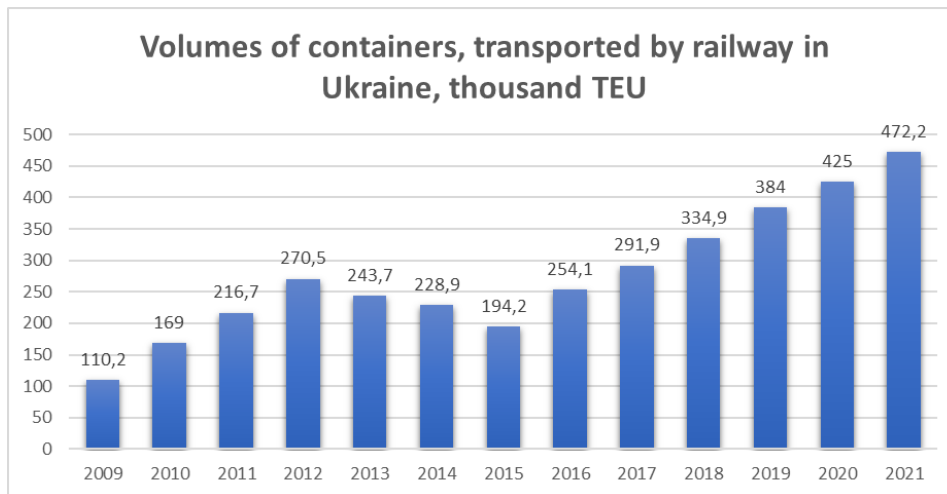


Fig. 2. Changes in container transportation on Ukrainian railways

Railway border crossings are one of the most congested places. They often work at maximum possible throughput and aren't able to handle large volumes of cargo. The greatest number of railway border crossings is situated on the Ukrainian-Polish border. The load is often distributed unevenly because of lack of specialist cargo handling equipment. As an example, there is Mostyska with an active cargo facility, Rava-Ruska and Yagodyn with minimum of freight capability. A big junction station, Chop, is situated on the Ukrainian-Slovakian and the Ukrainian-Hungarian borders. It is able to work with cargo, which passes to/from these countries. There are two railway lines (to Poland and Slovakia), which pass into these countries without track gauge change.

Container terminals on the Ukrainian side are situated in Mostyska and near Chop. At the same time Slovakia and Poland have their own terminals for Ukrainian containers. Railway capacity on these routes is gradually being increased. However, facilities at the underutilized border stations Yagodyn and Rava-Ruska aren't effectively utilized.

Railway border crossing «Yagodyn» is the northernmost on the Ukrainian-Polish border. It is situated closer than others to the Polish seaports of Gdansk, Gdynia, Szczecin and Swinoujscie, so it could be the most

convenient passing point for cargo transportation in these directions. In addition, there are some issues related to the absence of electrification and bad track conditions, but these can be resolved with the right will.

In addition to the construction of border terminals we should discuss the domestic network of container terminals in Ukraine. Our country occupies a large territory with an uneven density of potential users of freight transport. It is true that the highest concentration is situated in big cities and near them. At the same time, it is necessary to consider a suitable distance from the war zone during designing the network. We could consider General container terminals – special structures, that would include the necessary engineering and technical facilities for maintenance (loading, unloading and sorting) of containers and an administrative area for dealing with container documents and client service. An example is the West container terminal in Ternopil. It has advantages such as its situation in the geographical centre of Western Ukraine and equidistance from other regional centres [12].

Before the war routes of container trains connected Ukrainian cities and Baltic seaports with Odesa. They had the advantage of not needing to change bogies on borders. We couldn't do without it during the formation of

new routes so we should focus on distance and capacity. Two-track electrified railway lines are able to transport the most amount of cargo. There are three busy railway directions which have a common line of length of more than 50 km, near Lviv. This line doesn't have any alternatives, which is not practical for a country at war [13]. There are 3 railway directions from Lviv to the border, 2 of them pass through the Carpathians and contain some mountain cuts. A disadvantage is there would be a concentration of cargo flows in Lviv, which increases risks related to its overloading. Inside Ukrainian cities are well enough provided by means of communication,

while international transportation is complicated by passing through border crossings.

We consider the most probable routes through Yagodyn for more detailed research. This will make it possible to clearly verify the necessity of this direction. Kyiv, Kharkov, Odesa and Dnipro we can assume to be departure points for containers. Comparison will be made with the closest container terminals to Yagodyn – Mostyska in Ukraine and Sławków in Poland. As a result, in three cases out of four the smallest distance is through Yagodyn (Fig. 3).

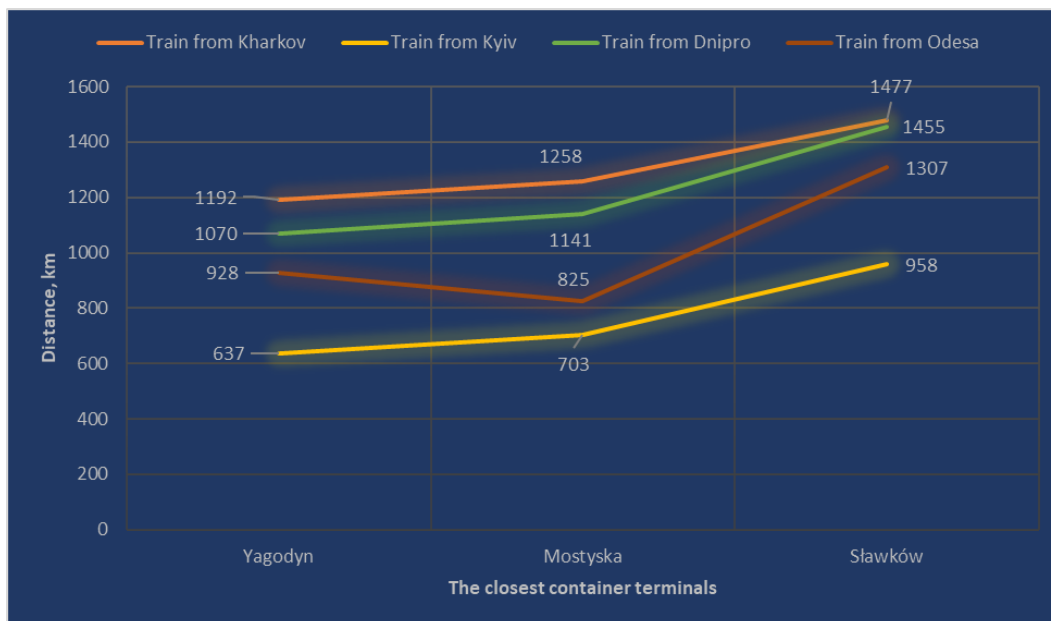


Fig. 3. A comparison of distances (city – terminal)

After a distance comparison from cities to terminals it is necessary to do the same with terminals and final destinations of containers which are situated beyond Ukraine. We consider the closest European seaports (in this case – Szczecin, Gdansk in Poland and Klaipeda in Lithuania) as we aim to replace Ukrainian ones.

It is possible to find out that the shortest distance to the Polish seaports is from

Sławków. This town is situated in the central part of Poland and it has a relatively advantageous geographical position. The distance to Klaipeda is shorter from Yagodyn. In addition, a container terminal in Poland wouldn't have an advantage if we combined comparisons and marked the distance along the complete routes (Fig. 4).

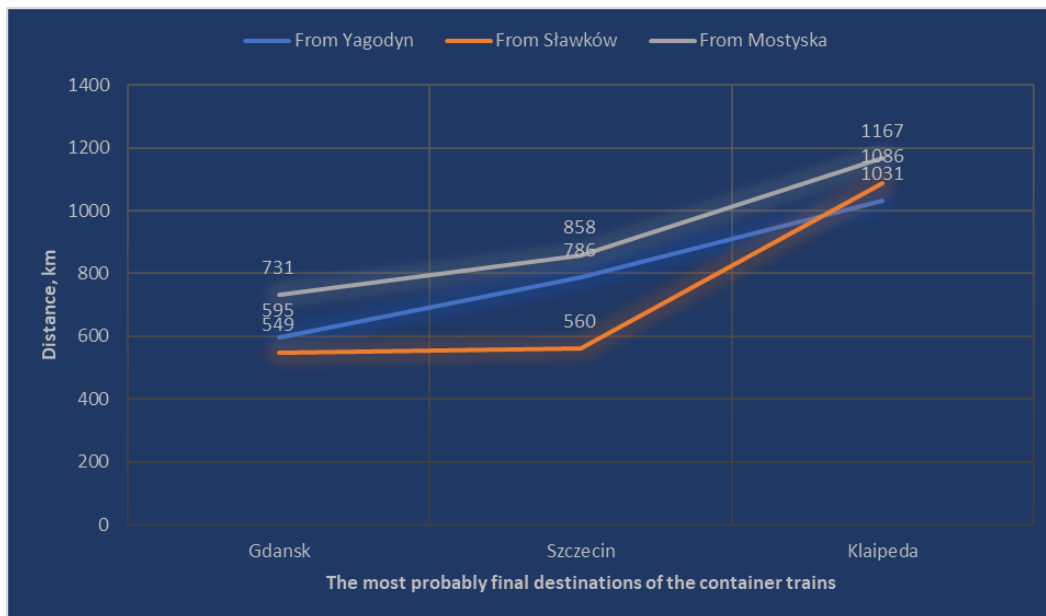


Fig. 4. A comparison of distances (terminal – seaport)

The following table 1 gives the shortest distances through Yagodyn at 11 of 12 proposed directions. They are about 200 km in most cases, so we are able to speed up the movement of containers for almost a day at the current average speed of 200-300 km/day [13]. In addition, the cost of transportation will decrease, so it will attract potential customers. As an example we can look at the delivery of an own TEU container in Railway’s carriage. In this case we should use the tariff scheme № 10 of the Tariff Guide № 1 [14]. According to this, the cost of transportation of a container within the borders of Ukraine will be about 1800-1900 hryvnas. Shortening the distance will allow customers to save about 100 hryvnas on a container, this will be about 80000 hryvnas for the average amount of containers in a train.

These facts allow us to admit a need for designing the new cargo railway corridor through Yagodyn. Nowadays this station carries out bogie changes on a small amount of passenger trains, so it is necessary to design devices to work with freight. If cargo is delivered in containers, a decision to create a

new container terminal in Yagodyn will be the most optimal. In addition, at this station there are tracks with different gauges, so there is a need to provide arriving carriages with bogies of both 1520 and 1435 mm (Table).

We could also note the possibility of creating new border crossings in the west of the country. They would allow us to relieve existing ones and to increase the speed of cross-border transportation. There is an ambiguous situation near Chop. In this town border crossing to Hungary both cars and trains are able to pass. At the same time a border control towards Slovakia is provided for railway transport only. The road to Slovakia was closed in 1946 and there have been approaches to link the border since those times. Both countries have plans to open a new border crossing to allow the restoration of traffic on this road [15]. If opened, it will duplicate the existing «Chop (Strazh)» on crossing railway and relieve the car checkpoint in Uzhgorod. So nowadays we have a big demand to reopen this transborder road.

The shortest distances for the routes, km

Passing and destination points	Points of container trains departures in Ukraine			
	Kharkov	Kyiv	Dnipro	Odesa
Szczecin through: Yagodyn Sławków Mostyska	1978	1423	1856	1714
	2037	1518	2015	1867
	2116	1561	1999	1683
Gdansk through: Yagodyn Sławków Mostyska	1787	1232	1665	1523
	2026	1507	2004	1872
	1989	1434	1872	1556
Klaipeda through: Yagodyn Sławków Mostyska	2223	1668	2101	1959
	2563	2044	2541	2393
	2425	1870	2308	1992

The Rava-Ruska railway junction is underrated. It has four directions (two each inside Poland and Ukraine). A track to Hrebenne was used only by passenger trains to Warsaw until 2005, then it was dismantled. Another track to Werchrata has rare freight service. This line duplicates the Lviv – Przemyśl route through Mostyska railway connecting Rava-Ruska with the Polish mainline Przemyśl – Rzeszów – Krakow. The junction is situated between Lviv and Warsaw and has already been used as a transit point with plans of building a track with 1435 mm gauge. The following shows a scheme, that a distance between Lviv and Warsaw through Rava-Ruska is shorter than the similar one through Przemyśl by 60 km, the difference between the distances from Kyiv to Warsaw through Yagodyn and through Lviv is 210 km.

There are some obstacles for development of this railway hub: a poor state of tracks, an absence of electrification, and all lines have only one track in each direction. So, it is necessary to restore the railway line to Hrebenne to relieve the Mostyska border crossing, to rebuild new border crossings for

freight. It is also possible to design a new container terminal near Rava-Ruska. The junction could become a main hub for cargo from Western Ukraine to seaports of Poland and Germany, and as an additional hub for freight to Silesia and the Czech Republic (Fig. 5).

Conclusions. The necessity for the development of cargo flows through Yagodyn was defined. By the analysis this measure will increase the speed of freight moving. Using containers was defined as the most efficient means of transportation by both railway rolling stock with bogies for gauge 1520 and 1435 mm. For that it is necessary to design a new container terminal near Yagodyn as it is the closest border crossing to the Central Europe seaports. The shortest distances between the most probable points of container flows in most cases pass through Yagodyn. The possibilities of proposed border crossings in the west of the country were considered, including new border crossing for cars to Slovakia in Chop, which will relieve the car checkpoint in Uzhgorod, and the promising railway junction in Rava-Ruska, which will

allow speeding up cargo flows to Europe, provided it is restored. The development of this routes will help to relieve the existing

railway lines and thus will be of strategic importance for Ukraine.

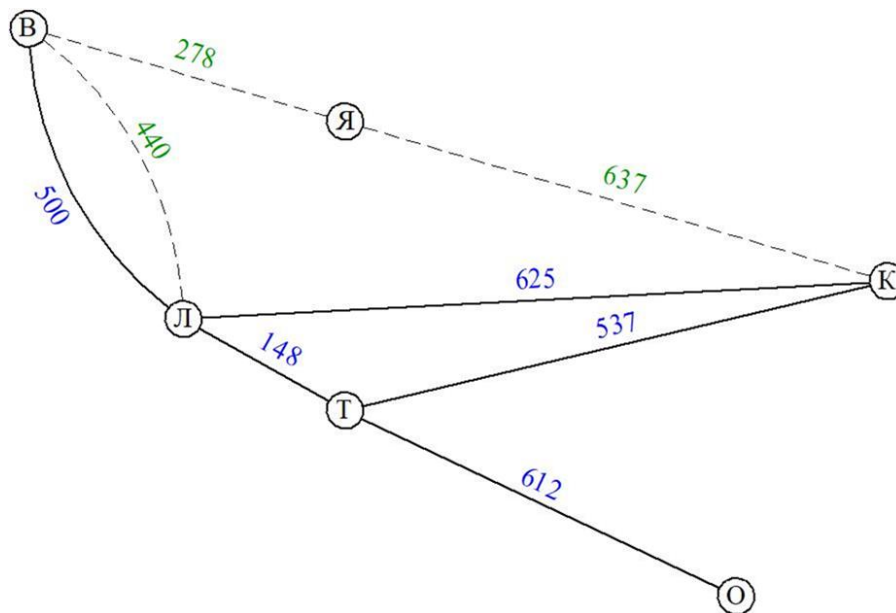


Fig. 5. A scheme of container flows routing from the cities of Ukraine to Warsaw, distances by railway in km. Proposed routes are dotted. Letters indicate cities (K – Kyiv, B – Warsaw, Я – Yagodyn, Л – Lviv, О – Odesa, Т – Ternopil)

References

1. MCTIDU, News. URL: <https://mtu.gov.ua/news/33944.html>, last accessed 2023/08/21.
2. ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF CONTAINER TRANSPORT AND RAIL TRANSPORT IN UKRAINE. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/603/565>, last accessed 2023/08/21.
3. Okorokov A. Analysis of prospects for the development of the container transportation market in Ukraine. *Transport systems and transport technologies* 10, 98–102 (2015).
4. Advantage and Disadvantages of Containerization. URL: https://www.marineinsight.com/maritime-law/advantage-and-disadvantages-of-containerization/#Economies_of_Scale, last accessed 2023/08/21.
5. Gaversky V. LEGAL SECURITY OF CONTAINER TRANSPORTATION: CURRENT STATE AND DEVELOPMENT IN UKRAINE. *LEX PORTUS* 3(5), 123–134 (2017).
6. MCTIDU, News. URL: <https://mtu.gov.ua/news/32665.html>, last accessed 2023/08/21.
7. Alyoshynsky Y. ORGANIZATIONAL PRINCIPLES OF MULTIMODAL TRANSPORTATION PLANNING. *TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES* 6/6(14), 4-6 (2013).
8. Butko T., Kolisnik A., Parkhomenko L. IMPROVEMENT OF THE ORGANIZATION OF INTERACTION BETWEEN RAILWAY JUNCTIONS AND PORTS IN CONTAINER TRANSPORTATION. *INTELLECTUAL TRANSPORT TECHNOLOGIES: Abstracts of conference reports*, 14-15 (2020).

9. Lomotko D., Smorkis I. ISSUES OF THE FORMATION OF A MODERN CONTAINER SYSTEM ON THE UKRAINIAN RAILWAYS BASED ON LOGISTICS PRINCIPLES. RAILWAY TRANSPORT OF UKRAINE 3/4, 23-30 (2016).

10. The Shipping magazine, Articles. URL: <https://sudohodstvo.org/kontejnernyj-rynok-prodolzhaet-konsolidirovatsya>, last accessed 2023/08/21.

11. Placek M. Global container trade in 2021, by trade lane. URL: <https://www.statista.com/statistics/1130550/global-container-trade-by-trade-lane/>, last accessed 2023/08/26.

12. The West Container Terminal Homepage. URL: <https://zahidcontainer.com/>, last accessed 2023/08/26.

13. Agreement on the provision of services for the organization of cargo transportation by rail transport. URL: <https://uz-cargo.com/contractcarriage.html>, last accessed 2023/08/09.

14. On the approval of the Collection of tariffs for the transportation of goods by rail transport within Ukraine and related services and the Coefficients applied to the Collection of tariffs for the transportation of goods by rail transport within Ukraine and related services. URL: https://uz.gov.ua/files/file/cargo_transportation/tariff/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B0%D1%80%D0%B8%D1%84%D1%96%D0%B2%20%D0%B7%D1%96%20%D0%B7%D0%BC%D1%96%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8.docx, last accessed 2023/02/09.

15. Na Ukrajinu má pribudnúť nový hraničný priechod. URL: <https://www.trend.sk/spravy/ukrajinu-ma-pribudnut-novy-hranicny-priechod>, last accessed 2023/08/09.

Shuldiner Juliya, PhD (Tech), Associate Professor, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6418-998X. E-mail: julia.shuldiner@gmail.com.

Prymachenko Hanna, PhD (Tech), Associate Professor, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7326-8997. E-mail: gannaprymachenko@kart.edu.ua.

Pashenko Heorhii, master, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0008-7699-2399. E-mail: pashegor2000@gmail.com.

Шульдінер Юлія Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6418-998X.

Тел.: +38 (050) 982-65-60. E-mail: julia.shuldiner@gmail.com.

Примаченко Ганна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7326-8997.

Тел.: +38 (066) 567-97-72. E-mail: gannaprymachenko@kart.edu.ua.

Пашенко Георгій Сергійович, магістр кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0008-7699-2399. Тел.: +38 (067) 918-51-18.

E-mail: pashegor2000@gmail.com.

Статтю прийнято 27.09.2023 р.

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

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

Випуск 205

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

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

Відповідальний за випуск Кальченко С. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 29.09.2023 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 10,0. Тираж 50. Замовлення № .

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