

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 8 (294)
2025**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 8 (294) 2025

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 8 (294) 2025

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), (Наказ МОН №157 від 09.02.2021 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151, 161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2018: 59.34).

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

Головна редакційна колегія:

Поркуян О.В., докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Могила В.І., докт. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Лорія М.Г.

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 2 від 26 вересня 2025 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2025

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2025

З М І С Т

Спеціальність 122

- Семаньків М.В., Ціхун О.В.**
ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ІМПЕЙНТИНГУ НА ОСНОВІ ГЕНЕРАТИВНИХ МОДЕЛЕЙ..... 5

Спеціальність 132

- Кирилаха С.В.**
НОВІ БІОСУМІСНІ ТИТАНОВІ СПЛАВИ З МІНІМАЛЬНИМ ЛЕГУВАННЯМ
(TI-O-FE-C-SI-AU / TI-MO-IN) ЯК АЛЬТЕРНАТИВА TI-6AL-4V 11

Спеціальність 133

- Артим В.І., Новосельський Б.А.**
ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ У ЗАМКОВОМУ РІЗЬБОВОМУ
З'ЄДНАННІ БУРИЛЬНИХ ТРУБ 18
- Лях М.М., Мацьків І.Р., Врюкало В.В., Яциняк І.І, Семенчук А.В., Процюк Г.Я.**
ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФЛАНЦЕВОГО З'ЄДНАННЯ..... 24

Спеціальність 141

- Spivak O.M., Ivanchenko S.S., Melkonova I.V. Melkonov H.L.**
IMPROVING THE RELIABILITY OF LOCOMOTIVE ELECTRICAL
POWER DEVICES BY ENHANCING CONTACT JOINTS..... 30

Спеціальність 151

- Карцюк Л.В., Давіденко Н.О., Якимець О.М., Титаренко О.В.**
НАРИСНА ГЕОМЕТРІЯ ЯК ОСНОВА ІНЖЕНЕРНОЇ ГРАФІЧНОЇ ОСВІТИ 39
- Моркун В.С., Моркун Н.В., Бобров Є.Ю., Грищенко Я.О.**
МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМУ ВЗАЄМОДІЇ БУРОВОГО ДОЛОТА З ГРСЬКОЮ ПОРОДОЮ 45

Спеціальність 161

- Бзовський І.К., Сергієнко Д.В., Целіщев О.Б., Кудрявцев С.О., Лорія М.Г.**
РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗНОГО КЕРУВАННЯ
ПІДВЕДЕННЯМ ЕНЕРГІЇ У ГІБРИДНИХ REM-PV СИСТЕМАХ СИНТЕЗУ ЗЕЛЕНОГО АМІАКУ 52
- Іщенко О.В., Страшний В.В., Кучинська Д.А., Ресницький І.В.,
Харитоненко Г.І., Кучинська М.А.**
КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ВЕТЕРИНАРНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ
НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО КРОХМАЛЮ 58

Спеціальність 273

- Кузишин А.Я., Ковальчук В.В.**
ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДЕФОРМУВАННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ РЕСОРИ
В УМОВАХ АВАРІЙНОЇ РОБОТИ..... 66

CONTENTS

Speciality 122

- Semankiv M.V., Tsikhub O.V.**
IMPROVEMENT OF IMAGE INPAINTING METHODS BASED ON GENERATIVE MODELS 5

Speciality 132

- Kyrylakha S.V.**
NEW BIOCOMPATIBLE TITANIUM ALLOYS WITH MINIMAL ALLOYING
(TI-O-FE-C-SI-AU / TI-MO-IN) AS AN ALTERNATIVE TO TI-6AL-4V 11

Speciality 133

- Artym V.I., Novoselskyi B.A.**
STUDY OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE LOCKED THREADED
CONNECTION OF DRILL PIPES 18
- Liakh M.M., Matskiv I.R., Vriukalo V.V., Yatsyniak I.I., Semenchuk A.V., Protsiuk H.Y.**
STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF FLANGE CONNECTIONS 24

Speciality 141

- Spivak O.M., Ivanchenko S.S., Melkonova I.V. Melkonov H.L.**
IMPROVING THE RELIABILITY OF LOCOMOTIVE ELECTRICAL POWER
DEVICES BY ENHANCING CONTACT JOINTS 30

Speciality 151

- Karpiuk L.V., Davidenko N.O., Yakymets O.M., Titarenko O.V.**
DESCRIPTIVE GEOMETRY AS THE BASIS OF ENGINEERING GRAPHIC EDUCATION 39
- Morkun V.S., Morkun N.V., Bobrov E.Y., Hryshchenko Y.O.**
MODELING THE MECHANISM OF INTERACTION BETWEEN A DRILL BIT AND ROCK 45

Speciality 161

- Bzovsky I.K., Serhiienko D.V., Tselishchev O.B., Kudryavtsev S.O., Loria M.G.**
DEVELOPMENT OF A LABORATORY INSTALLATION FOR MODEL-BASED CONTROL
OF ENERGY SUPPLY IN HYBRID PEM-PV SYSTEMS FOR GREEN AMMONIA SYNTHESIS 52
- Ishchenko O.V., Strashnyi V.V., Kuchynska D.A., Resnytskyi I.V.,
Kharitonenko G.I., Kuchynska M.A.**
COMPOSITE MATERIAL FOR VETERINARY PURPOSES BASED ON MODIFIED STARCH 58

Speciality 273

- Kuzyshyn A.Ya., Kovalchuk V.V.**
STUDY OF THE PECULIARITIES OF DEFORMATION OF A PNEUMATIC SPRING UNDER
CONDITIONS OF ITS EMERGENCY OPERATION 66

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-5-10>

УДК 004.932:004.942.5

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ІМПЕЙНТИНГУ НА ОСНОВІ ГЕНЕРАТИВНИХ МОДЕЛЕЙ

Семаньків М.В., Ціхун О.В.

IMPROVEMENT OF IMAGE INPAINTING METHODS BASED ON GENERATIVE MODELS

Semankiv M.V., Tsikhub O.V.

Обсяг візуальної інформації, що нас оточує, постійно зростає, і це зумовлює потребу в інтуїтивно зрозумілих інструментах для її обробки. Дослідження, які спрямовані на удосконалення алгоритмів для додавання або видалення об'єктів із графічного контенту, є актуальними та мають високий практичний потенціал. Системи, які використовують такі алгоритми, можуть знайти застосування в різних галузях – від кінематографа та фотографії до реставрації мистецьких творів і навіть медицини. Технологія Image inpainting дозволяє автоматично відновлювати відсутні частини зображення, економлячи час та зусилля користувача. Попри наявність великої кількості рішень для задач реконструкції все ще бракує систем, які б комплексно використовували генеративні моделі для досягнення високої якості відновлення контенту. Це підкреслює значущість досліджень у даній сфері, спрямованих на вдосконалення існуючих алгоритмів. Оцінка сучасного стану об'єкта дослідження характеризується значним прогресом у розвитку генеративних моделей. Водночас існує потреба в подальшому вдосконаленні для підвищення універсальності, оптимізації використання ресурсів та зменшення обчислювальних витрат. В роботі досліджено методи генеративних конкурентних мереж (GAN) для задач зафарбовування зображень, оцінено ефективність наявних підходів. Удосконалено метод генерації контенту із застосуванням унікальної функції втрат, яка за показниками точності та часу виконання перевищує розглянуті конкурентні реалізації. Розроблено програмне забезпечення для вирішення практичних задач. Проведено роботу над системою відновлення графічного контенту на основі GAN, здійснено її вдосконалення за рахунок математичних інструментів. Результати, що отримані в рамках

дослідження, демонструють покращення якості відновлення зображень за допомогою розробленої системи на основі GAN, хорошу якість видалення структур із зображень з мінімальними артефактами навіть при низькій роздільній здатності за короткий час. Однак, слід зауважити, точність відновлення може знижуватися при роботі із складними чи деталізованими зображеннями. Практична значущість дослідження поширюється на всі галузі, де обробка візуальних даних має ключове значення. Вона полягає у вирішенні проблеми неякісного видалення об'єктів із зображень, розвитку алгоритмів заміни та видалення конкретних ділянок на зображеннях за допомогою генеративних конкурентних мереж.
Ключові слова: inpainting, GAN-мережі.

Вступ. Імпейнтинг (image inpainting) є перспективним напрямом комп'ютерної графіки, що забезпечує відновлення, видалення або генерацію відсутніх фрагментів зображення з високим рівнем реалістичності. Розвиток цієї технології пов'язаний із застосуванням глибинних нейронних мереж, зокрема дифузійних моделей, які здатні враховувати як локальні текстурні особливості, так і глобальний семантичний контекст. Завдяки цьому імпейнтинг має широкі перспективи у сфері цифрової реставрації, медичної візуалізації та автоматизованого редагування мультимедійних даних, формуючи основу для інтелектуальних систем нового покоління.

Одним із актуальних напрямків у дослідженнях імпейнтингу є видалення обраних об'єктів із зображень та заповнення пустих

ділянок реалістичним контентом. Це має важливе практичне значення, оскільки дозволяє автоматизувати редагування фотографій та відео для медіаіндустрії, реклами, кінематографу та систем відеоспостереження, а також сприяє захисту конфіденційності та персональних даних. Водночас цей напрямок є перспективним завдяки можливостям сучасних методів глибокого навчання, зокрема генеративно-змагальних мереж і дифузійних моделей, які дозволяють створювати високоякісний контент, адаптований до конкретного контексту сцени, та стимулюють розвиток суміжних галузей, таких як генеративний дизайн, доповнена реальність і реставрація історичних зображень. Проте він залишається надзвичайно складним через необхідність врахування складних взаємозв'язків між текстурами, освітленням, перспективою та структурою сцени, особливо при видаленні великих або критично важливих об'єктів, де важливо логічно інтегрувати новий контент у композицію зображення, зменшуючи ризик появи артефактів або генерації неправдоподібних деталей. Все це робить об'єктно-контекстний імпейнтинг науково та інженерно вимогливим завданням.

Дослідження напрямку. Розвиток даного напрямку включає розробку нових архітектур нейронних мереж, оптимізацію функцій втрат, використання нормалізаційних потоків і методів трансформерів для підвищення точності, швидкості та ефективності алгоритмів. Результати досліджень демонструють прогрес у розвитку генеративних моделей та підтверджують перспективність подальшого вдосконалення методів імпейнтингу для досягнення високої якості відновлення контенту. В статті [1] запропоновано метод імпейнтингу, який дозволяє видаляти об'єкти із зображень на основі текстових інструкцій. В [2] показано каскадну модифікацію GAN для імпейнтингу, що враховує структуру об'єктів на зображенні. В [3] автор описує метод, що дозволяє безшовно видаляти об'єкти разом із їхніми візуальними ефектами. Ці статті охоплюють різні аспекти задачі видалення об'єктів з зображень, від використання текстових інструкцій до складних нейронних мереж з урахуванням об'єктів. Але описані методи мають ряд недоліків, а саме: у дуже складних сценах або при великій кількості одночасно видалених об'єктів модель може генерувати артефакти або спотворені деталі; використання великих моделей і наборів даних робить навчання та інференс ресурсомісткими [4-5].

Постановка задачі. Сучасні методи імпейнтингу зазвичай базуються на глибоких нейронних мережах, зокрема:

- GAN (Generative Adversarial Networks) – створюють реалістичні деталі для заповнення порожніх ділянок.

- Transformers і Diffusion-моделі – забезпечують більш узгоджене і контекстуально точне заповнення.

- Маскування з контекстним увагою (contextual attention) – враховує найближчі пікселі та структуру зображення для кращої інтеграції заповненого фрагмента.

Для реалізації системи “розумного” видалення об'єктів із зображень, яка базується на використанні генеративних конкурентних мереж із унікальною функцією втрат, необхідно виконати кілька кроків: визначити джерела даних, проаналізувати їх придатність, оцінити характеристики обраного датасету та обґрунтувати вибір методу машинного навчання [5].

GAN мережа побудована на двох основних компонентах: генераторі та дискримінаторі. Генератор складається з двох підмереж:

- SINet (Semantic Inferring Network): Екстрагує семантичні ознаки з вхідного зображення, враховуючи замасковані області. Для цього використовуються згорткові шари зі послідовним збільшенням кількості каналів.

- GPNet (Global Perceiving Network): Захоплює глобальний контекст зображення, тому обробляє як приховані, так і відкриті ділянки. Розширені згортки зберігають просторову інформацію. Схожа будова на SINet, тільки без деконволюційних шарів.

Після обробки вхідних даних у згаданих мережах, вихідні значення комбінуються: оригінальне зображення разом з маскою об'єднується з відновленим SINet результатом, формуючи повне представлення зображення. Далі воно передається в GPNet для подальшого вдосконалення. Така методика забезпечує якість штучних даних, роблячи дискримінатору складнощі у визначенні походження зображення. Тому він має бути достатньо ефективним, щоб обробляти складні патерни.

Дискримінатор функціонує як бінарний класифікатор, архітектурно може бути представлений як традиційна згорткова нейронна мережа (CNNs). Правильно підібраний дизайн нейромережі, є істотним, оскільки його здатність до розмежування ознак прямо впливає на коректну роботу системи (запобігає затуханню градієнта) [6].

Дискримінатор мінімізує від'ємну логістичну ймовірність правильної класифікації як реальних, так і згенерованих зразків, що можна виразити через формулу:

$$\nabla \theta_d \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\log D(x^{(i)}) + \log (1 - D(G(z^{(i)})))]$$

де $D(x^{(i)})$ – ймовірності того, що дискримінатор

D класифікує оригінальне зображення $x^{(i)}$ як реальне;

$\log (1 - D(G(z^{(i)})))$ – логарифм ймовірності того, що дискримінатор D класифікує згенероване зображення $G(z^{(i)})$ як не реальне.

На основі результату дискримінатора, функція втрат генератора оцінює свою роботу для нейронної мережі.

Використання генеративних конкурентних мереж (GAN) для задач видалення об'єктів із зображень супроводжується низкою проблем, що обмежують якість відновлення контенту. До основних труднощів належать поява артефактів та розмиття у згенерованих областях, непослідовність кольорових та текстурних характеристик порівняно з навколишнім середовищем, а також семантична невідповідність відновлених фрагментів контексту сцени. Значним викликом є залежність від якості та різноманітності навчальних даних, що обумовлює низьку здатність моделі до узагальнення у випадку нестандартних вхідних даних. Додатково проблемними залишаються висока обчислювальна складність, потреба у великих обсягах даних та нестабільність процесу навчання, що може призводити до колапсу моделі. У сукупності ці фактори вказують на необхідність подальшого вдосконалення архітектур і методів оптимізації GAN для підвищення якості та надійності реконструкції зображень [7-8].

Метою роботи є вдосконалення методу на основі GAN для генерації зображень, використовуючи функції втрат з оптимальними вагами. На основі проведених досліджень вдосконалено метод на основі GAN, який вирішуватиме вище обговорені проблеми шляхом використання нової функції втрат, що комбінує адверсарні L1 та L2 втрати з оптимальними вагами. Такий підхід підвищить якість відновлення частин зображень, до того ж забезпечить стабільність навчання моделі.

Для GAN моделі розроблено наступні формули, які контролюють навчання генератора та дискримінатора:

$$L_{gen} = -E_x[D(G(x))] + \lambda_1 L_2 + \lambda_2 L_1,$$

$$L_{gen} = E_x[L_{real}(D(G(x)))] + E_z[L_{fake}(D(G(x)))] + \lambda_1 L_2 + \lambda_2 L_1,$$

де L_{gen} – функція помилки генератора;

L_{real} – функція втрат для реальних зображень; E_x – це очікування, що зображення є реальним;

$D(G(x))$ – вихід дискримінатора D , який приймає згенероване зображення $G(x)$ як вхід;

E_z – очікування за латентними змінними z ;

$\lambda_1 L_2, \lambda_2 L_1$ – регуляризаційні члени із коефіцієнтами.

Завдяки системі інтелектуального видалення, розробленої у межах даного дослідження, користувачі мають змогу модифікувати різні зображення із мінімальними артефактами, адаптовуючи їх до власних потреб.

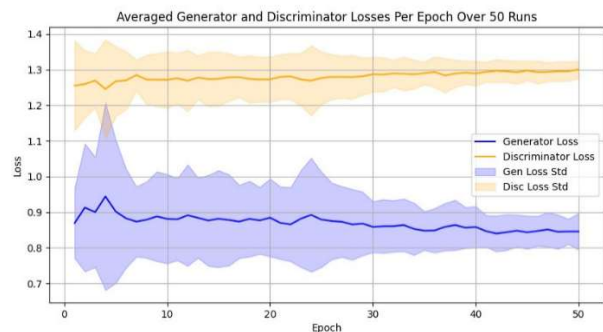


Рис. 1. Графік базової функції втрат під час навчання

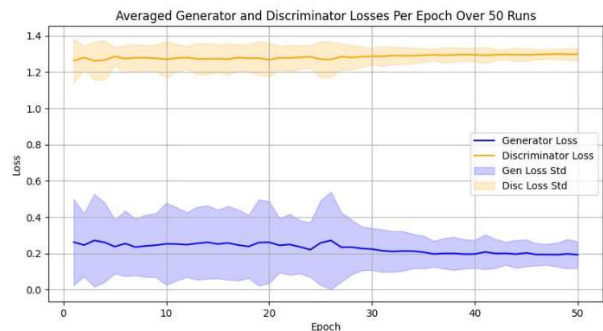


Рис. 2. Графік кастомної функції втрат, розробленої в цьому дослідженні

Проводилося дослідження на платформі Google Colab, вона надає можливість використовувати різні графічні процесори, що підходять для тренування базової генеративної моделі на наборі даних MNIST (складається із зображень рукописних цифр від 0 до 9. Незважаючи на свою простоту, дозволяє швидко перевірити експериментальні концепції).

При тому, що архітектура моделі залишається незмінною протягом навчання, функція втрат визначає, як оптимізатор коригує ваги та параметри алгоритму. Вона вчиться на основі результатів, які отримує з функцією втрат (чим більше значення втрат, тим сильніші будуть зміни в параметрах) чим точніша модель – тим менші втрати. Оновлюються параметри, зменшуючи втрати в наступних ітераціях і покращуючи алгоритм в цілому.

Розробка додає елементи кастомізації, поєднує різні типи втрат з можливістю налаштування ваг для кожної з них. Така комбінація впроваджує новизну для реалізації, хоча основні компоненти широко використовуються.

Створена унікальна функція втрат, може бути використана для задачі image inpainting, бо адверсальна втрати допомагає генератору створювати більш реалістичні зображення. А L1 і L2 втрати можуть допомогти досягати високої якості відновлення, зменшуючи різницю між оригінальними та відновленими ділянками.

Результати, отримані в рамках дослідження, демонструють значне покращення якості відновлення зображень за допомогою розробленої системи на основі GAN. У порівнянні з базовими критеріями втрат для задач відновлення. Зокрема, система показала покращення в середньому на 65% у значеннях функції втрат для генератора, порівнюючи із базовою моделлю (з 0.9 до 0.3). Порівнюючи з методом циклічної втрати, покращення зросли в межах 2-3%. При цьому вона зберегла високу ефективність за часом обчислень та стабільність роботи дискримінатора. Загальний час виконання однієї ітерації в середньому зріс лише на 0.94% (з 635 до 641 секунди) для базової реалізації та на 2% для методу циклічної втрати.

Приклад, наведений на рис.1 демонструє результат видалення об'єкта із зображення. Варто зазначити, що колір собаки схожий із заднім фоном, що частково посприяло якіснішому заповненню. Водночас незважаючи на досить велику маску, система впоралася із завданням на належному рівні.



а



б



в

Рис. 3. Результат усунення великої частини зображення:

а – початкове зображення;
б – зображення з маскою; в – результат видалення

Висновки. Проаналізовано методи, які є основою для розробки системи зафарбовування зображень. Досліджено актуальні підходи для видалення та створення текстури з метою заповнення потрібних частин. Удосконалено метод генерації контенту із застосуванням унікальної функції втрат, яка за показниками точності та часу виконання перевищує розглянуті конкурентні реалізації. Розроблено

систему видалення об'єктів із цифрових зображень, що використовує алгоритм GAN на базі Python та його бібліотек. Система орієнтована на широкий спектр користувачів: від бізнес-компаній до кінцевих споживачів, які прагнуть покращити обробку візуальних даних за допомогою інструментів редагування.

Результати демонструють задовільну якість видалення структур із зображень з мінімальними артефактами, навіть при низькій роздільній здатності за короткий час. Однак, точність відновлення може знижуватися при роботі із складними чи деталізованими зображеннями. У дослідженні була розроблена методика видалення об'єктів за допомогою інтеграції сучасних типів архітектур нейронних мереж з унікальною функцією втрат.

Розроблене рішення дозволяє автоматизувати процеси редагування зображень, що зменшує витрати часу та ресурсів, необхідних для виконання таких завдань вручну. Система забезпечує доступ до інноваційних технологій для широкого кола користувачів та знижує витрати на спеціалізоване програмне забезпечення. Завдяки цьому розробка має не лише наукове, а й соціально-економічне значення, сприяючи доступності обробки візуальної інформації. Здійснено дослідницьку роботу для оптимізації методу GAN та побудовано програмну реалізацію системи, яка дозволяє у короткий термін усувати небажані компоненти із зображень. Результати дослідження підтверджують ефективність розробленого рішення. Таким способом користувачі можуть ефективно редагувати графічний контент відповідно до персональних вподобань.

References

1. Inst-Inpaint: Instructing to Remove Objects via Text Prompts. Cornell University. URL: <https://arxiv.org/abs/2304.03246> (data accessed: 05/09/2025)
2. Image Inpainting with Cascaded Modulation GAN and Object-Aware Training. Cornell University. URL: <https://arxiv.org/abs/2203.11947> (data accessed: 04/09/2025)
3. Remove Objects and Their Effects in Images with Paired Video-Frame Data. Cornell University. URL: <https://arxiv.org/abs/2501.07397> (дата звернення 05.09.2025)
4. Barglazan A.-A., Brad R., Constantinescu C. Image Inpainting Forgery Detection: A Review. J. Imaging. 2024. Vol. 10, No. 2. P. 42. URL: <https://doi.org/10.3390/jimaging10020042>
5. What is a GAN?. Amazon. URL <https://aws.amazon.com/what-is/gan/> (data accessed: 02/09/2025)
6. GpNet: Simplifying Graph Neural Networks via Multi-channel Geometric Polynomials. Cornell University. URL: <https://arxiv.org/abs/2209.15454> (data accessed: 05/09/2025)
7. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge, MA: MIT Press, 2016. P.775.
8. Ma Y., Liu X., Bai S., Wang L., He D., Liu A. Coarse-to-Fine Image Inpainting via Region-wise Convolutions and Non-Local Correlation. The 28th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-19). 2019. P. 3123–3129. URL: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/433>

Semankiv M.V., Tsikhub O.V. Improvement of image inpainting methods based on generative models

The volume of visual information surrounding us is constantly growing, which creates the need for intuitive tools for its processing. Research aimed at improving algorithms for adding or removing objects from graphical content is highly relevant and has significant practical potential. Systems employing such algorithms can be applied across various domains—from cinematography and photography to the restoration of artworks and even medicine. Image inpainting technology enables the automatic reconstruction of missing parts of an image, saving users time and effort. Despite the abundance of existing solutions for reconstruction tasks, there is still a lack of systems that comprehensively leverage generative models to achieve high-quality content restoration. This highlights the importance of research in this field, focusing on improving current algorithms. The assessment of the current state of the field shows considerable progress in the development of generative models. At the same time, further refinement is needed to enhance universality, optimize resource usage, and reduce computational costs. This work investigates methods of Generative Adversarial Networks (GANs) for image inpainting tasks and evaluates the effectiveness of existing approaches. A content generation method has been improved by introducing a unique loss function, which surpasses the considered competitive implementations in terms of both accuracy and execution time. Software has been developed to address practical tasks. Work has been carried out on a GAN-based system for graphical content restoration, with improvements achieved through mathematical tools. The results obtained in the course of the research demonstrate enhanced image restoration quality with the proposed GAN-based system, including high-quality object removal with minimal artifacts, even at low resolution and within a short processing time. However, it should be noted that restoration accuracy may decrease when dealing with complex or highly detailed images. The practical significance of this research extends to all fields where visual data

processing is crucial. It lies in addressing the problem of low-quality object removal from images and advancing algorithms for replacing and removing specific regions in images using Generative Adversarial Networks.

Keywords: *inpainting, GAN-network.*

Ціхун Олександр Васильович – магістр, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника (м. Івано-Франківськ) oleksandr.tsikhun@gmail.com

Семаньків Марія Василівна - к.т.н., доц. кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника (м. Івано-Франківськ) mariia.semankiv@pnu.edu.ua

Стаття подана 19.09.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-11-17>

УДК 669.295:615.46

НОВІ БІОСУМІСНІ ТИТАНОВІ СПЛАВИ З МІНІМАЛЬНИМ ЛЕГУВАННЯМ (Ti–O–Fe–C–Si–Au / Ti–Mo–In) ЯК АЛЬТЕРНАТИВА Ti-6Al-4V

Кирилах С.В.

NEW BIOCOMPATIBLE TITANIUM ALLOYS WITH MINIMAL ALLOYING (Ti–O–Fe–C–Si–Au / Ti–Mo–In) AS AN ALTERNATIVE TO Ti-6Al-4V

Kyrylakha S.V.

У роботі розглянуто сучасні підходи до створення нових титанових сплавів для біомедичних застосувань із акцентом на контроль мікроструктури, фазового складу та експлуатаційних властивостей шляхом варіації легувальних елементів і параметрів обробки. Показано, що класичний сплав Ti-6Al-4V, попри поширене використання, має низку обмежень, зокрема невідповідність модуля пружності біомеханічним характеристикам кісткової тканини та можливі ризики, пов'язані з вивільненням токсичних компонентів Al і V. У цьому контексті актуальними є дві стратегії: багатокомпонентне легування титанової матриці елементами з підвищеною біосумісністю, зокрема системи типу Ti–O–Fe–C–Si–Au, та цілеспрямована β-стабілізація на прикладі сплавів β-Ti–Mo–In. Перша стратегія забезпечує формування дрібнозернистої α/β-структури з підвищеною дислокаційною щільністю та покращеною корозійною стійкістю, що є важливим для тривалої експлуатації у складних середовищах. Друга стратегія дозволяє стабілізувати β-фазу зі зниженим модулем пружності та підвищеною пластичністю, що сприяє оптимізації співвідношення міцності й деформаційної здатності. Аналіз експериментальних досліджень останніх років свідчить, що контрольоване легування киснем та залізом сприяє підвищенню межі плинності понад 900 МПа при збереженні відносного подовження до 15 %, тоді як легування золотом підвищує біосумісність без зниження пластичності. У свою чергу, β-сплави Ti–Mo–In характеризуються стабільною фазою та модулем пружності, ближчим до властивостей кісткової тканини. Встановлено, що поєднання мінімального легування та оптимізованої термомеханічної обробки дозволяє

одночасно досягти високих механічних характеристик, корозійної стійкості та біосумісності. Додатково відзначено, що введення Mo сприяє утворенню стабільної β-фази з ефектом зниження еластичного модуля, тоді як домішки In покращують опір корозійно-втомному руйнуванню. Для системи Ti–O–Fe–C–Si–Au встановлено, що навіть малі концентрації домішок дозволяють керувати фазовими перетвореннями та зменшувати схильність до крихкого руйнування завдяки твердорозчинному зміцненню та дисперсійному розподілу фаз. Практична цінність запропонованих систем полягає у можливості отримання матеріалів із прогнозованим ресурсом роботи в агресивному біологічному середовищі та більш точною відповідністю механічним характеристикам кісткової тканини. Зроблено висновок про перспективність подальших досліджень у напрямку керування фазових перетворень, текстуроутворення, механізмів зміцнення та оптимізації технологічних параметрів, що відкриває нові можливості для розроблення матеріалів наступного покоління з покращеним комплексом експлуатаційних властивостей.

Ключові слова: титанові сплави; мікроструктура; легування; β-стабілізація; біосумісність; механічні властивості; імплантологія.

Вступ. Титан та його сплави відіграють ключову роль у сучасному матеріалознавстві завдяки поєднанню високої питомої міцності, корозійної стійкості та біосумісності. Найбільш поширеним є сплав Ti-6Al-4V, який активно застосовується в авіакосмічній та медичній промисловості. Проте його використання обмежене через наявність у складі алюмінію та

ванадію, що потенційно можуть проявляти токсичність та негативний вплив на біологічні тканини [Long, Rack, 1998] [1]. Додатковим фактором є ефект невідповідності модуля пружності кістковій тканині, що може призводити до зниження довговічності імплантів [Geetha et al., 2009] [2].

У зв'язку з цим активізувались дослідження, спрямовані на розроблення нових титанових сплавів із підвищеною біосумісністю та зниженим модулем пружності. Значну увагу приділено β -стабілізаторам (Nb, Mo, Ta, Zr), які дозволяють формувати структури з покращеними експлуатаційними властивостями [Geetha et al., 2009] [2]. Проте такі підходи супроводжуються складністю технологічної реалізації та високою вартістю легуючих елементів.

Важливим внеском у цю проблематику стали дослідження Haase та співавт. (2022) [3], де було запропоновано концепцію мінімального легування титанових сплавів елементами O, Fe, C, Si, Au та Mo. Автори показали, що контрольоване мікролегування дозволяє зберегти міцність матеріалу та забезпечити стабільність мікроструктури без використання токсичних елементів [Haase et al., 2022] [3].

Додатково варто відзначити роботу Romero-Reséndiz та ін. (2023), у якій розроблено новий β -сплав Ti-15Mo-5In. Використання індію як біосумісного легувальника у поєднанні з молібденом дозволило знизити модуль пружності та підвищити корозійну стійкість, що розширює перспективи застосування таких матеріалів у високотехнологічних галузях [Romero-Reséndiz et al., 2023] [4].

Таким чином, проблеми токсичності та надмірного модуля пружності Ti-6Al-4V ефективно вирішуються шляхом мінімального або альтернативного легування титану, що дозволяє зберегти високу міцність, стабільну мікроструктуру та покращену біосумісність [1-8].

Актуальність і новизна. Відомо, що один із найпоширеніших медичних титанових сплавів Ti-6Al-4V має суттєві обмеження, зумовлені токсичністю елементів Al і V, а також підвищеним модулем пружності, що не відповідає властивостям кісткової тканини [Sarraf et al., 2021]. У зв'язку з цим упродовж останніх років активно досліджуються альтернативні системи, зокрема β -сплави Ti-Nb, Ti-Zr, Ti-Mo та їх комбінації, які забезпечують зниження модуля пружності та підвищену біосумісність [J. Alloys & Compounds, 2020;

Scientific Reports, 2023]. Проте більшість таких матеріалів характеризуються складним легуванням та неоднозначним балансом міцності й пластичності [3-9].

На цьому тлі особливу новизну становить підхід, запропонований у роботі Haase та співавт. [Haase et al., 2021], що полягає у концепції мінімального легування. Використання невеликих концентрацій біосумісних елементів (O, Fe, Si, Au, Mo) дозволяє досягати високого рівня механічних властивостей при збереженні пластичності та одночасно мінімізувати фазову складність. Це відкриває перспективи для створення нових біомедичних титанових матеріалів, здатних замінити традиційний Ti-6Al-4V.

Серед новітніх напрямів особливу увагу привертають титанові сплави з концепцією «мінімального легування», коли використання невеликих кількостей біосумісних елементів дозволяє досягти оптимального поєднання міцності, пластичності та корозійної стійкості. До цієї групи належить сплав Ti-0.44O-0.5Fe-0.08C-0.4Si-0.1Au, запропонований Haase [3], в якому поєднання кисню і заліза забезпечує твердорозчинне зміцнення, кремній і вуглець сприяють стабілізації структури, а золото підвищує біосумісність без зниження пластичності.

Результати показали формування дрібнозернистої $\alpha+\beta$ -мікроструктури з межею плинності понад 900 МПа та відносним подовженням близько 15 %, що робить систему перспективною для медичного застосування. Іншим прикладом є β -сплав Ti-15Mo-5In, досліджений Romero-Reséndiz [4], у якому молібден виконує роль β -стабілізатора і знижує модуль пружності, а індій забезпечує високу біосумісність. У результаті формується рівноважна β -фаза з модулем пружності близько 65–75 ГПа, що наближений до показників кісткової тканини, при міцності понад 750 МПа та пластичності вище 20 %. Таким чином, обидві системи демонструють сучасний підхід до створення альтернатив Ti-6Al-4V для імплантології.

Метою роботи є аналіз сучасних підходів до створення біосумісних титанових сплавів з мінімальним або альтернативним легуванням та оцінка їхньої перспективності у контексті заміни традиційного сплаву Ti-6Al-4V.

Виклад основного матеріалу дослідження. У роботі F. Haase та співавторів (2021) [3] досліджено вплив малих концентрацій кисню, заліза, кремнію та золота на формування

мікроструктури та механічні властивості сплавів титану. Показано, що введення обмеженої кількості кисню (~0,44 мас. %) у поєднанні з Fe та Si забезпечує суттєве зміцнення твердого розчину при збереженні достатньої пластичності. Особливо відзначено роль золота як біосумісного легувальника, що стабілізує структуру та підвищує корозійну стійкість, що важливо для імплантаційних застосувань. Результати мікроструктурного аналізу (рис.1) демонструють різницю у розподілі зерен залежно від товщини пластин після рекристалізаційного відпалу: у тонких зразках спостерігається більш однорідна дрібнозерниста структура, тоді як у товстих формується комбінація дрібних та витягнутих зерен. Це свідчить про неоднакові умови деформації та рекристалізації при термомеханічному обробленні.

Аналіз механічних випробувань показав, що комбінація легування киснем і Fe у сплаві Ti-0.44O-0.5Fe-0.08C-0.4Si-0.1Au забезпечує суттєве підвищення міцності: межа плинності перевищує 950 МПа, а межа міцності сягає понад 1050 МПа. При цьому відносне подовження зберігається на рівні 12–15 %, що свідчить про збереження задовільної пластичності. Введення невеликої кількості Au сприяє підвищенню біосумісності без істотної втрати деформаційної здатності.

Для порівняння, β -Ti-15Mo-5In демонструє нижчі показники міцності ($\sigma_{0.2} \approx 750\text{--}800$ МПа), але значно вищу пластичність ($\delta \approx 20\text{--}25$ %), що

обумовлено стабілізацією β -фази. Отримані результати підтверджують ефективність концепції “мінімального легування”, коли додавання невеликих концентрацій біосумісних елементів дозволяє оптимізувати мікроструктуру та забезпечити збалансовані механічні характеристики (рис. 2).

Для оцінки механічних характеристик титанових сплавів систем Ti-O-Fe-Si-Au та β -Ti-Mo-In проводили стандартні випробування на розтяг при кімнатній температурі (DIN EN ISO 6892-1:2017-02). Зразки виготовляли у формі плоских пластин після остаточної прокатки та рекристалізаційного відпалу, що забезпечувало репрезентативність дослідження. Випробування показали суттєві відмінності у поведінці двох систем: для Ti-O-Fe-Si-Au зафіксовано підвищення межі плинності за рахунок модифікації киснем і залізом, тоді як β -Ti-Mo-In виявив вищу пластичність і стабільність структури у порівнянні з α + β -сплавами [10].

Для верифікації структурних спостережень було проведено стандартні випробування на розтяг (DIN EN ISO 6892-1:2017-02; DIN 50125:2016-12) [10, 11]. Зразки обох систем виготовляли у вигляді плоских пластин після прокатки та рекристалізаційного відпалу, що забезпечувало однорідність мікроструктури. Результати свідчать про суттєву різницю у поєднанні міцності та пластичності для розглянутих сплавів (табл.).

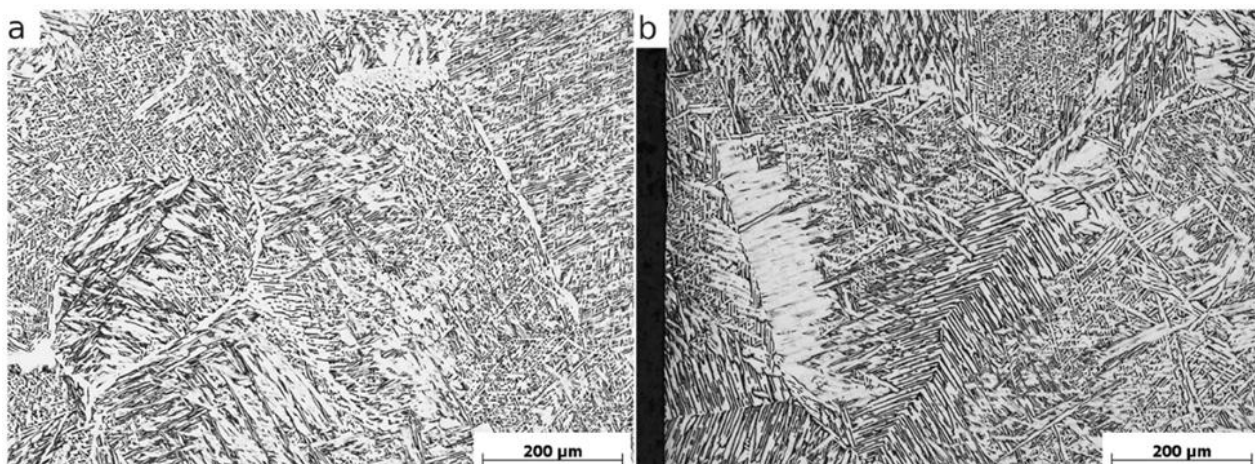


Рис. 1. Порівняння мікроструктури сплаву Ti-0,44O-0,5Fe-0,08C-0,4Si-0,1Au у поздовжньому перерізі на краю та в центрі тонкої й товстої пластини після фінальної прокатки та рекристалізаційного відпалу [3]

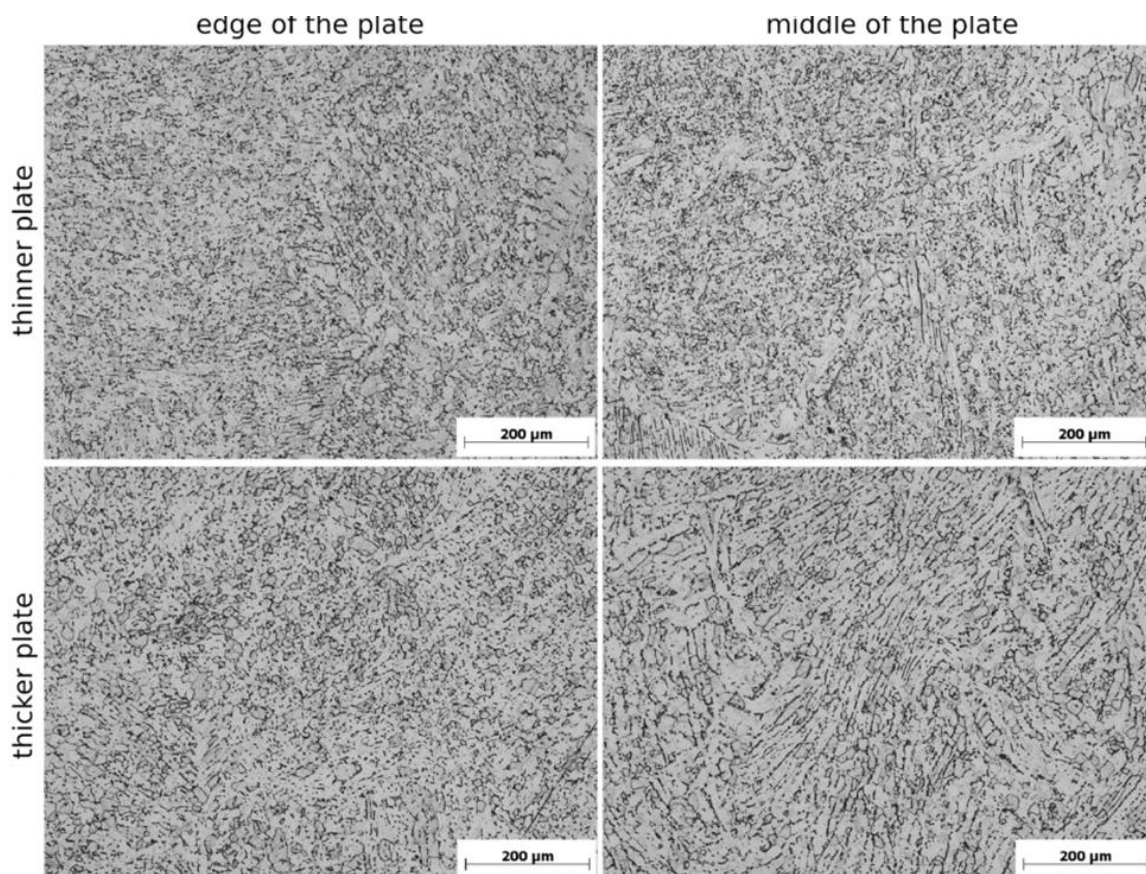


Рис. 2. Мікроструктура сплаву $Ti-0.44O-0.5Fe-0.08C-0.4Si-0.1Au$ після прокатки та рекристалізаційного відпалу (порівняння краю й середини пластини різної товщини) [3]

Таблиця

Механічні властивості досліджуваних титанових сплавів

Сплав	Межа плинності, $\sigma_{0.2}$, МПа	Межа міцності, σ_b , МПа	Відносне подовження, δ , %	Характерна особливість
$Ti-0.44O-0.5Fe-0.08C-0.4Si-0.1Au$	~950–1000	~1050–1100	12–15	Підвищена міцність за рахунок O та Fe
$\beta-Ti-15Mo-5In$	~750–800	~850–900	20–25	Висока пластичність, стабільність β -фази

Як видно з табл. 1, сплав системи $Ti-O-Fe-Si-Au$ забезпечує значне підвищення міцності завдяки комплексному легуванню, проте з деяким зниженням пластичності. Натомість $\beta-Ti-Mo-In$ характеризується меншою межею міцності, проте зберігає високу пластичність і стабільність β -фази, що критично важливо для довготривалої експлуатації у біомедичних застосуваннях.

У роботі L. Romero-Reséndiz та співавт. (2023) [4] було розроблено переважно β -сплав $Ti-15Mo-5In$ для біомедичних застосувань. Введення індію як біосумісного легувальника забезпечило значне зниження модуля пружності (до 60–70 ГПа), що наближає його до рівня кісткової тканини та мінімізує ефект «stress

shielding». Мікроструктурні дослідження виявили переважання β -фази з локальними включеннями α та α'' , причому зерен β -структури переважно нанометрового та субмікронного діапазону. Це забезпечило сприятливу комбінацію низького модуля та достатньої міцності (рис.3).

Детальний аналіз фракцій фаз показав, що понад 70 % структури становить стабільна β -фаза, тоді як α'' та α утворюють лише локальні ділянки. Саме такий фазовий баланс визначає низький модуль пружності у поєднанні з задовільною міцністю. Крім того, сплав характеризується високою корозійною стійкістю у фізіологічному середовищі, що підтверджує його потенціал для застосування в ортопедичній імплантології [12].

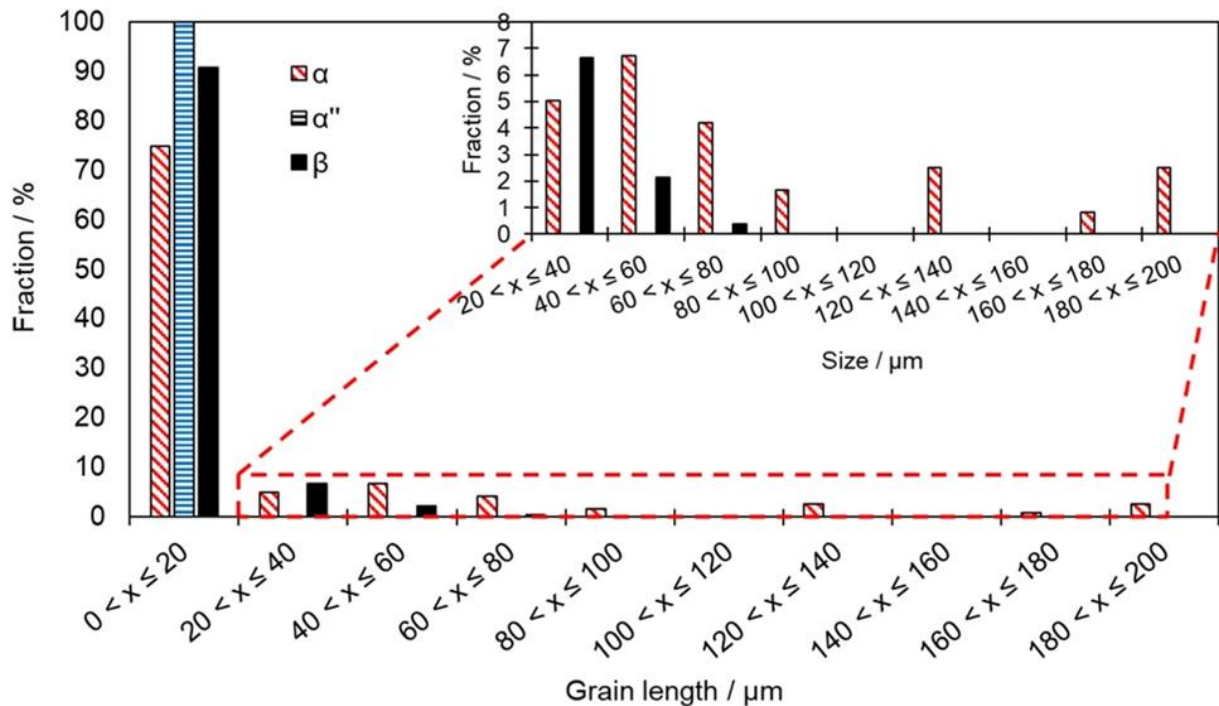


Рис. 3. Розподіл довжини зерен у сплавi Ti–15Mo–5In з виділенням фаз α , α'' та β [4]

Зіставлення результатів двох робіт демонструє різні підходи до розв'язання актуальної проблеми: Naase та співавтори використовують концепцію мікролегування киснем, Fe, Si та Au для підвищення міцності при збереженні пластичності, тоді як Romero-Reséndiz та співавт. концентруються на зниженні модуля пружності за рахунок легування β -стабілізаторами (Mo) та індієм. Таким чином, у першому випадку акцент зроблено на механічному зміцненні, у другому — на біомеханічній сумісності з кістковою тканиною.

Отримані результати свідчать, що різні підходи до легування титанових сплавів дозволяють цілеспрямовано змінювати їхню мікроструктуру та експлуатаційні характеристики для біомедичних застосувань. У роботі F. Naase та співавт. [3] застосовано комплексне легування системи Ti із залізом, кремнієм, вуглецем, киснем і невеликим вмістом золота, що сприяло формуванню дрібнозернистої структури після прокатки та рекристалізаційного відпалу. Аналіз мікроструктур (рис. 4–5) показав наявність однорідних зерен у центральній частині пластини та дещо відмінний розподіл фазових складових біля країв, що зумовлено особливостями деформаційно-термічної історії матеріалу. Важливо, що така комбінація легувальників забезпечила не лише стабільність структури, але й поліпшення корозійної

стійкості та біосумісності, зокрема завдяки введенню Au як біоінертного елемента [13–15].

На відміну від цього, L. Romero-Reséndiz та співавт. [4] запропонували інший підхід, заснований на переважно β -стабілізованому сплавi Ti–15Mo–5In. Введення молібдену забезпечує утворення стабільної β -фази, тоді як індій відіграє роль додаткового елемента, що знижує модуль пружності та підвищує сумісність із кістковою тканиною. Представлений розподіл розмірів зерен і фазових складових (рис. 6) свідчить про утворення рівномірної структури з домінуванням β -фази та мінімальним вмістом α'' -фази. Це підтверджує можливість керованого регулювання співвідношення фаз для досягнення бажаних механічних параметрів.

Порівняльний аналіз цих досліджень показує, що хоча обидва підходи спрямовані на підвищення біосумісності та зниження модуля пружності у порівнянні з традиційним Ti-6Al-4V, вони реалізуються різними шляхами. У випадку Naase та співавт. [3] акцент зроблено на комплексному легуванні з урахуванням біоінертних елементів і контрольованій термомеханічній обробці, тоді як Romero-Reséndiz та співавтори [4] роблять ставку на формування стабільної β -фази за рахунок цілеспрямованого введення Mo та In.

Обидва підходи підтверджують, що нові титанові системи здатні не лише знизити рівень

токсичних домішок, але й забезпечити більш сприятливу відповідність механічних характеристик матеріалу з біологічними тканинами. З огляду на наведені результати, актуальними залишаються подальші дослідження довготривалої стабільності фазового складу в умовах біосередовища, а також випробування на реальних імплантологічних моделях. [3, 4, 16-18]. Поєднання високої біосумісності, контрольованої мікроструктури та оптимальних механічних властивостей відкриває перспективи створення нового покоління титанових сплавів для медицини, здатних ефективно замінити сплав Ti-6Al-4V.

Висновки. 1. Показано, що нові системи титанових сплавів, зокрема Ti-0.44O-0.5Fe-0.08C-0.4Si-0.1Au та β -Ti-15Mo-5In, дозволяють цілеспрямовано регулювати мікроструктуру та фазовий склад, забезпечуючи кращу відповідність біомеханічним вимогам у порівнянні з традиційним Ti-6Al-4V.

2. Для сплаву Ti-0.44O-0.5Fe-0.08C-0.4Si-0.1Au встановлено, що комплексне легування з введенням біоінертних елементів у поєднанні з прокаткою та рекристалізаційним відпалом формує рівномірну дрібнозернисту структуру. Це сприяє підвищенню корозійної стійкості та забезпечує достатній рівень міцності й пластичності.

3. Аналіз β -Ti-15Mo-5In показав, що стабілізація β -фази за рахунок молібдену та регулюючий вплив індію забезпечують значне зниження модуля пружності й кращу сумісність з біомеханічними властивостями кісткової тканини. Структурні спостереження підтвердили рівномірний розподіл зерен із мінімальною часткою α'' -фази.

4. Узагальнення даних свідчить, що багатокомпонентний підхід (Ti-O-Fe-C-Si-Au) забезпечує структурну стабільність і біосумісність, тоді як β -орієнтований (Ti-Mo-In) дозволяє регулювати пружні властивості. Обидва напрями відкривають перспективи створення нового покоління біосумісних титанових матеріалів із контрольованим поєднанням міцності, пластичності та довговічності.

5. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оцінку довготривалої стабільності фазового складу в умовах біологічного середовища та перевірку ефективності нових сплавів у реальних імплантологічних застосуваннях. Це визначить

можливість їх практичного впровадження замість сплаву Ti-6Al-4V.

Література

- 1 Long, M., Rack, H. J. Titanium alloys in total joint replacement — A materials science perspective. *Biomaterials*. 1998. Vol. 19(18). P. 1621–1639. DOI: 10.1016/S0142-9612(97)00146-4
- 2 Geetha, M., Singh, A. K., Asokamani, R., Gogia, A. K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. *Progress in Materials Science*. 2009. Vol. 54(3). P. 397–425. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.06.004
- 3 Haase F., Siemers C., Rosler J. Two novel titanium alloys for medical applications: Thermo-mechanical treatment, mechanical properties, and fracture analysis. *Journal of Materials Research*. 2022. Vol. 37. P. 2589–2603. DOI :10.1557/s43578-022-00605-2.
- 4 Romero-Resendiz L., Rossi M. C., Segui-Esquembre C., Amigo-Borras V. Development and characterization of a new predominantly β Ti-15Mo-5In alloy for biomedical applications. *J Mater Sci*. 2023. Vol. 58. P. 15828–15844. DOI: 10.1007/s10853-023-09017-x.
- 5 Sarraf M., Ghomi E. R., Alipour S., Ramakrishna S., Sukiman N. L. A state-of-the-art review of the fabrication and characteristics of titanium and its alloys for biomedical applications. *Biodes Manuf*. 2021. Vol. 5(2). P. 371–395. DOI: 10.1007/s42242-021-00170-3
- 6 Bordbar-Khiabani A. Gasik M. Electrochemical and biological characterization of Ti-Nb-Zr-Si alloy for orthopedic applications. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. P. 2312. DOI: 10.1038/s41598-023-29553-5
- 7 Shen J.Y., Hu L.X., Sun Y., Feng X.Y., Fang A.W., Wan Z.P. Hot deformation behaviors and three-dimensional processing map of a nickel-based superalloy with initial dendrite microstructure. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 822. P. 153735. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.153735
- 8 Liu J., Wang K., Li X., Zhang X., Gong X., Zhu Y., Ren Z., Zhang B., Cheng, J. Biocompatibility and osseointegration properties of a novel high strength and low modulus β -Ti10Mo6Zr4Sn3Nb alloy. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023. Vol. 11. P. 1127929. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1127929
- 9 Mustafi L., Nguyen V.T., Song T., Deng Q., Murdoch B.J., Chen X.-B., Fabijanic D.M., Qian M. A strong and ductile biocompatible Ti40Zr25Nb25Ta5Mo5 high entropy alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 30. P. 7885-7895. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.05.118
- 10 DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 6892-1:2017-02, Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature (ISO 6892-1:2016); German version

- EN ISO 6892-1:2016 (Beuth Verlag GmbH, Berlin). DOI: 10.31030/2384831
- 11 DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 50125:2016-12, Testing of Metallic Materials—Tensile Test Pieces (Beuth Verlag GmbH, Berlin). DOI: 10.31030/2577390
 - 12 Senopati Galih, Rashid Rizwan Abdul Rahman, Kartika Ika, Palanisamy Suresh Recent Development of Low-Cost β -Ti Alloys for Biomedical Applications: A Review. *Metals*. 2023. Vol. 13(2), P. 194. DOI: 10.3390/met13020194
 - 13 Alabort E., Tang Y.T., Barba D., Reed R.C. Alloys-by-design: A low-modulus titanium alloy for additively manufactured biomedical implants. *Acta Materialia*. 2022. Vol. 229. P. 117749 DOI: 10.1016/j.actamat.2022.117749
 - 14 Zhang, L.-C. Chen L.-Y., A Review on biomedical titanium alloys: recent progress and prospect. *Adv. Eng. Mater.* 2019. Vol. 21(4), P. 1801215. DOI: 10.1002/adem.201801215
 - 15 Li Y., Yang C., Zhao H., Qu S., Li X., Li Y. New developments of Ti-based alloys for biomedical applications. *Materials*. 2014. Vol. 7(3), P. 1709–1800 DOI: 10.3390/ma7031709
 - 16 Siemers C., Brunke F., Saks K., Kiese J., Kohnke M., Haase F., Schlemminger M., Eschenbacher P., Fürste J., Wolter D., Sibum H. Development of advanced titanium alloys for aerospace, medical and automotive applications, in *Proceedings of the XXVIII International Mineral Processing Congress (IMPC 2016), September 11-15 2016, Québec City, Canada* (Canadian Institute of Mining Metallurgy & Petroleum (CIM), Westmount, Canada, 2016), pp. 3600–3611
 - 17 Lütjering G., Williams J.C., *Titanium*, 2nd edn. (Springer, Berlin, 2007). DOI:10.1007/978-3-540-73036-1
 - 18 Peters M., Hemptenmacher J., Kumpfert J., Leyens C. Structure and properties of titanium and titanium alloys, in *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. ed. by C. Leyens, M. Peters (Wiley, Weinheim, 2003), pp. 1–36. DOI:10.1002/3527602119.ch1

Kyrylakha S.V. New Biocompatible Titanium Alloys with Minimal Alloying (Ti–O–Fe–C–Si–Au / Ti–Mo–In) as an Alternative to Ti–6Al–4V

The paper examines contemporary approaches to the design and development of advanced titanium alloys for biomedical applications, with a focus on microstructural engineering, phase composition control, and functional property optimisation through variation

of alloying additions and thermomechanical treatments. It is demonstrated that the conventional Ti–6Al–4V alloy, despite its widespread utilisation, exhibits several intrinsic drawbacks, such as a significant mismatch in elastic modulus compared to natural bone tissue and the risk of releasing cytotoxic alloying components, particularly aluminium and vanadium. In this context, two innovative alloying strategies are considered. The first involves multicomponent alloying of the titanium matrix with biocompatible elements, exemplified by Ti–O–Fe–C–Si–Au systems, which provide grain refinement, increased dislocation density, enhanced strength, and corrosion resistance under long-term exposure to aggressive physiological environments. The second strategy focuses on targeted β -stabilisation, as realised in β -Ti–Mo–In alloys, which promote the formation of a stable β -phase with reduced elastic modulus and improved ductility, ensuring superior compatibility with biomechanical requirements. Experimental investigations in recent years confirm that controlled oxygen and iron alloying increases yield strength above 900 MPa while maintaining elongation of around 15 %, whereas minor additions of gold significantly improve biocompatibility without compromising plasticity. At the same time, β -Ti–Mo–In alloys demonstrate stable phase configurations and elastic moduli close to those of bone tissue, reducing the risk of stress shielding and ensuring long-term implant reliability. It is established that the combination of minimal alloying strategies with optimised thermomechanical processing enables the simultaneous achievement of high mechanical strength, corrosion resistance, and biocompatibility. These findings underline the prospects of further research into controlled phase transformations, texture evolution, and strengthening mechanisms, opening up opportunities for the design of next-generation titanium-based materials with improved clinical efficiency and engineering applicability.

Keywords: titanium alloys; microstructure; alloying; β -stabilisation; biocompatibility; mechanical properties; implantology.

Кирилаха Світлана Вікторівна – аспірантка кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій, факультету будівництва, архітектури та дизайну, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, lanakirilaha@gmail.com

Стаття подана 11.09.2025

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-18-23>

УДК 622.2

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ У ЗАМКОВОМУ РІЗЬБОВОМУ З'ЄДНАННІ БУРИЛЬНИХ ТРУБ

Артим В.І., Новосельський Б.А.

STUDY OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE LOCKED THREADED CONNECTION OF DRILL PIPES

Artym V.I., Novoselskyi B.A.

Вплив температури на різьбові з'єднання є одним з важливих чинників, який впливає на їх міцність, герметичність і довговічність в процесі експлуатації. При підвищених температурах матеріали різьби зазнають теплового розширення, що змінює геометричні параметри та посадки, впливає на зусилля затягування та герметичність з'єднання. Високі температури сприяють пластичній деформації поверхневих шарів різьби, пришвидшенню зносу й утворенню люфтів, що знижує надійність з'єднання. Замкове різьбове з'єднання (ЗРЗ), яке використовується у бурильних колонах, які застосовуються під час спорудження нафтових та газових свердловин, має відповідати вимогам міцності, втомної довговічності, герметичності. Для дослідження побудовано тривимірну модель ЗРЗ з різьбою NC50 відповідно до технічних умов та проведено її імітаційне моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) для визначення розподілу температури в тілі труби та ЗРЗ при умові температури бурового розчину 20 °C всередині труби і зовні труби – 100 °C. Встановлено, що розподіл температури з тілі труби та ЗРЗ є нерівномірним. Розглядаючи розподіл температури у ЗРЗ спостерігається зниження температури із сторони упорного торця ніпеля до тіла муфти з 70 °C до 47 °C. Отриманий температурний градієнт у трубі та ЗРЗ використаний як вхідні дані для подальшого аналізу напружено-деформованого стану ЗРЗ. Встановлено розподіл напружень у ЗРЗ під дією моменту згвинчування та моменту згвинчування в поєднанні із температурним впливом. Результати імітаційного моделювання показали, що температура знижує величини еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля на 15–19%, особливо у впадинах перших двох витків ніпеля. Це зниження напружень може позитивно вплинути на втомну міцність і ресурс

з'єднання. Отже, врахування температурного впливу є важливим під час проектування, виготовлення та оцінки надійності різьбових з'єднань, особливо в умовах експлуатації бурильних колон у змінних температурних режимах. Подальшим кроком є дослідження втомної міцності ЗРЗ з урахуванням температурного впливу та коректування розрахункового моменту згвинчування. **Ключові слова:** бурильна колона, замкове різьбове з'єднання, напружено-деформований стан, напруження, температура.

Вступ. Вплив температури на різьбові з'єднання має важливе значення для їх міцності та надійності під час експлуатації. При підвищених температурах в матеріалах різьби відбуваються теплові розширення, які можуть змінювати розміри елементів з'єднання, що впливає на посадки (зазори або натяги). Це призводить до зміни сил затягнення, які необхідні для забезпечення герметичності та міцності з'єднання.

Також висока температура сприяє пластичній деформації поверхневих шарів різьби, особливо в місцях локального контакту, що може викликати утворення люфтів або послаблення з'єднання. Внаслідок теплової деградації зношуються поверхні різьбових елементів, що знижує їх зносостійкість та довговічність.

Для компенсації теплових впливів у відповідальних різьбових з'єднаннях застосовують розширені допуски та посадки з зазором, а також підсилені способи затягування болтів або гвинтів. Особливо це важливо для

різбових з'єднань з натягом, де забезпечення гарантованих величин крутних моментів вигвинчування є критичним.

При роботі з жароміцними й нержавіючими матеріалами діаметри отворів під різьбу збільшують, щоб врахувати теплові деформації та забезпечити якісне нарізання різьби, що впливає на довговічність з'єднання.

Встановлено, що температура впливає на геометрію, міцність, точність посадки та експлуатаційні характеристики різбових з'єднань. Це вимагає врахування впливу температури при проектуванні, виготовленні та монтажі різбових з'єднань..

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій. Замкове різьбове з'єднання (ЗРЗ) застосовується для збирання бурильної колони з таких елементів як бурильні труби, перевідники, долото, калібратори тощо.

Під час експлуатації ЗРЗ має забезпечувати наступні вимоги, а саме: володіти необхідною статичною міцністю; чинити опір втомі при дії розтягуючих, стискаючих та згинаючих навантажень та крутних моментів; швидко розбиратись та збиратись; бути герметичним; мати високу зносостійкість тощо.

Найнебезпечнішими перерізами, по яких відбувається руйнування ЗРЗ, є перший спряжений виток різьби ніпеля, який знаходиться на відстані 24 мм від його упорного торця [1], та небезпечний переріз муфти, що знаходиться на відстані 10 мм від меншого торця ніпеля.

У роботі [2] для визначення напружено-деформованого стану різбового з'єднання, у якому є відхилення одного з найважливіших параметрів різьби, а саме, основної площини, побудовано тримірну модель з'єднання NC50 для дослідження методом скінченних елементів (МСЕ). У результаті проведеного імітаційного моделювання різбового з'єднання, основна площина якого розміщена відповідно до вимог нормативних документів, встановлено розподіл напружень по впадинах різьби ніпеля, згідно з яким максимальні напруження виникають у впадинах витків, розміщених ближче до опорного торця, а з віддаленням від них поступово знижуються. Такий розподіл напружень, отриманий за допомогою імітаційного моделювання збігається із відомими теоріями. Проведені імітаційні моделювання, за яких розміщення основної площини зміщено на 2 мм в бік опорного торця ніпеля, показали зміну розподілу та зростання величини напружень по впадинах різьби ніпеля

та зміну величини контактного тиску на опорних торцях ніпеля і муфти. Необхідно зауважити, що такі зміни негативно вплинуть на роботу різбового з'єднання. Дослідження різбового з'єднання, у якому основна площина зміщена на 2 мм у бік від опорного торця ніпеля, показали зростання напружень по впадинах витків різьби ніпеля та різке зниження величин контактного тиску на опорних торцях ніпеля та муфти. За таких умов різьбове з'єднання зруйнується за малої кількості циклів роботи.

У роботі [3] наведено моделювання та розрахунки болтового фланцевого з'єднання, що знаходиться в умовах підвищеної температури. Виконано аналіз зусиль, що діють на болт та з'єднувані елементи, на основі аналітичних формул та з використанням МСЕ. При теоретичних розрахунках застосовано рекомендації, наведені в матеріалах із основ проектування машин. Під час числових розрахунків використовується спрощена модель болта. Отримані результати розрахунків перевіряються на предмет виконання прийнятого критерію міцності, пов'язаного з допустимим термічним напруженням у болті. Наведено вибрані результати імітаційних досліджень МСЕ моделі з'єднання у вигляді розподілу температури в моделі. На основі порівняння результатів теоретичного та числового аналізу визначено корисність спрощеної моделі болта для розрахунків сил у болтах фланцевих з'єднань в умовах підвищеної температури.

Автори [4] зазначають, що вібрація та навантаження можуть спричинити втомне руйнування болтових з'єднань, особливо тих, які працюють при високих температурах. Досліджується малоциклова втома попередньо затягнутих болтів, що працюють при високій температурі. Розроблено новий випробувальний пристрій для досліджень з'єднань на втому на якому проведено малоциклові випробування попередньо затягнутих болтів при дії температур 550 °С та 650 °С. Крім того, запропоновано нову модель малоциклової втоми, яка базується на критерії еквівалентного напруження/деформації фон Мізеса, яка використовується для прогнозування високотемпературної малоциклової втоми попередньо затягнутих болтів відповідно до результатів напруження/деформації, отриманих МСЕ. Встановлено відповідність між експериментальними результатами та теоретичними результатами, що підтверджує точність запропонованої моделі втоми.

Результати дослідження забезпечать теоретичну основу для прогнозування малоциклової втоми попередньо затягнутих болтів.

У роботі [5] зазначено, що стирання різьби є однією з основних форм руйнування з'єднань нафтогазових труб. Проведено серію повномасштабних випробувань на зразках неосаджених різьбових з'єднань труб зі сталі API J55. Розподіл температури та полів напружень різьбового з'єднання труб вимірювався динамічно під дією різних крутних моментів та швидкостей згвинчування та розгвинчування різьбових з'єднань. Були вивчені основні фактори, які впливають на розподіл температур та полів напружень різьбових з'єднань труб, а їх вплив на руйнування внаслідок стирання узагальнено за допомогою теорії тертя та зношування. Моделі скінченних елементів різьбових з'єднань труб перевірено шляхом порівняння числових результатів з результатами натурних випробувань. Перевірені моделі згодом використовуються для проведення параметричних досліджень поведінки з'єднання.

Проте у роботах, де досліджуються напружено-деформований стан ЗРЗ під час прикладання граничних умов зазвичай не враховується температура. Оскільки бурильна колона експлуатується у різні пори року, на її ресурс ЗРЗ буде впливати температура. Температура повітря взимку може сягати до мінус 40 °С, а температура у свердловині – плюс 100°С та більше. Тому в даній роботі основна увага буде приділена впливу зміни температури на напружено-деформований стан ЗРЗ бурильних труб.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Метою роботи є дослідження впливу температури на напружено-деформований стан ЗРЗ з врахуванням дії моменту згвинчування.

Для досягнення мети необхідно:

- встановити розподіл температур у ЗРЗ при температурі бурового розчину 20°С всередині ЗРЗ та 100°С ззовні.

- визначити напружено-деформований стан ЗРЗ при дії моменту згвинчування;

- дослідити напружено-деформований стан ЗРЗ при дії моменту згвинчування та температури;

- порівняти отримані результати дослідження, зробити висновки, окреслити напрями подальших досліджень.

Викладення основного матеріалу

Під час побудови тривимірної моделі ЗРЗ використано ТУ 26-12-775-90 [6] на замкові з'єднання для труби ОБТ НВ I із різьбою NC50 (рис. 1).

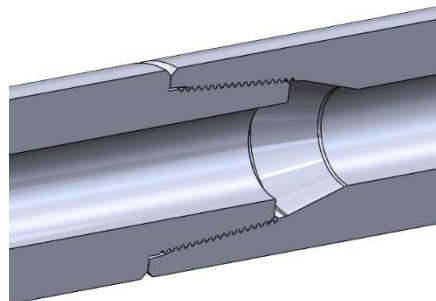


Рис. 1. Фрагмент моделі труби ОБТ НВ I із різьбою NC50

На рисунку 2 показано розрахункову схему для дослідження розподілу температур у ЗРЗ.

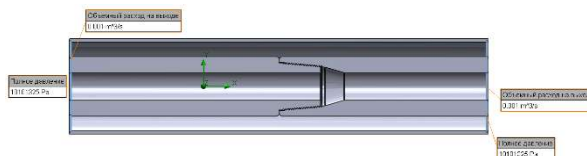


Рис. 2. Розрахункова схема для дослідження розподілу температур у ЗРЗ

Граничними умовами прийнято температуру рідини всередині ЗРЗ рівною 20 °С, ззовні ЗРЗ – 100 °С. Витрата рідини становить 0,001 м³/с.

У результаті імітаційного моделювання отримано розподіл температури у трубі та ЗРЗ (рис. 3).

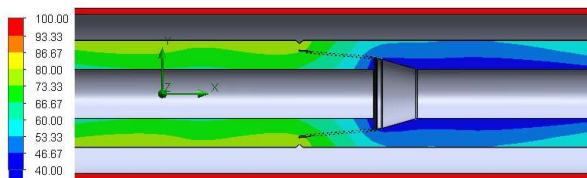


Рис. 3. Розподіл температури у трубі та ЗРЗ

Отже, згідно рисунку 3, розподіл температури у тілі труби та ЗРЗ є нерівномірним. Зниження температури у ЗРЗ відбувається із сторони упорного торця ніпеля до тіла муфти з 70 °С до 47 °С.

Для зручності розуміння отримуваних результатів імітаційного моделювання необхідно зазначити напрямок та початок відліку впадин різьб ніпеля (рис. 4).

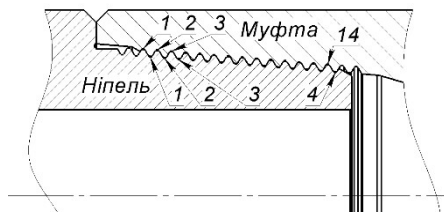


Рис. 4. Напрямки та початок відліку впадин різьб ніпеля та муфти

З метою побудови графічних залежностей розподілу температури у трубі та ЗРЗ на них виконано лінії (рис. 5).

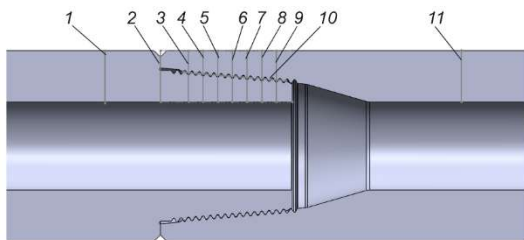


Рис. 5. Лінії для побудови графічних залежностей:

- 1 – тіло труби; 2 – на торцях ніпеля та муфти;
- 3 – впадина першого витка ніпеля; 4 – впадина третього витка ніпеля; 5 – впадина п'ятого витка ніпеля; 6 – впадина сьомого витка ніпеля;
- 7 – впадина дев'ятого витка ніпеля; 8 – впадина одинадцятого витка ніпеля; 9 – впадина тринадцятого витка ніпеля; 10 – середній діаметр різьби; 11 – тіло муфти

На рисунку 6 показано зміну температури по поздовжніх перерізах труби та ЗРЗ згідно рисунку 5, а на рисунку 7 – зміну температури по середньому діаметрі різьби ЗРЗ.

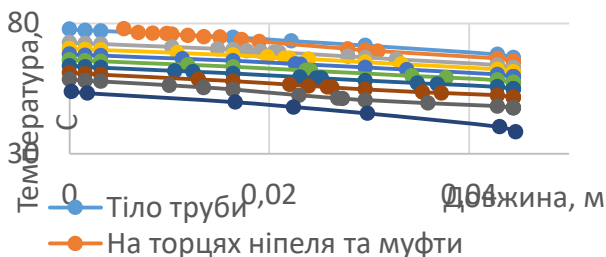


Рис. 6. Зміна температури по поздовжніх перерізах труби та ЗРЗ (згідно рисунку 5)

Отже, виходячи з результатів поданих на рисунку 6, у поздовжніх перерізах труби та ЗРЗ спостерігається пропорційний спад температури із максимуму 75°C до 38°C.

Що стосується зміни температури ЗРЗ по середньому діаметру різьби, то вона спадає з 70°C до 45°C (рис. 7).

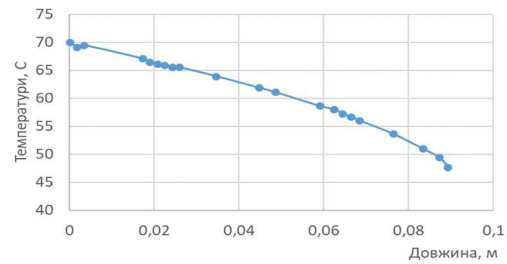


Рис. 7. Зміна температури по середньому діаметрі різьби ЗРЗ

Розглянемо та порівняємо розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля при дії на ЗРЗ тільки моменту згинчування та моменту згвинчування разом із температурою. Розподіл температури у трубі та ЗРЗ буде використаний як вхідне навантаження у модуль Simulation із модуля FlowSimulation.

Оскільки різьбове з'єднання побудоване не по гвинтовій лінії, а як проточки, то для імітації моменту згвинчування застосовано перекриття торців ніпеля та муфти на величину натягу 0,1 мм (аналогічно як у працях [2, 7]). Виходячи з того, що коефіцієнт запасу міцності для різьбових з'єднань становить 1,5 і границя міцності для матеріалу з яких виготовляють труби (45ХГМА) рівна 758 МПа, до такого з'єднання має прикладатися момент згвинчування, за якого напруження в ньому не перевищуватимуть 505 МПа. Під час моделювання враховується коефіцієнт тертя у всіх елементах різьби – 0,1.

На рисунку 8 показано розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі ЗРЗ (тільки від дії моменту згвинчування).

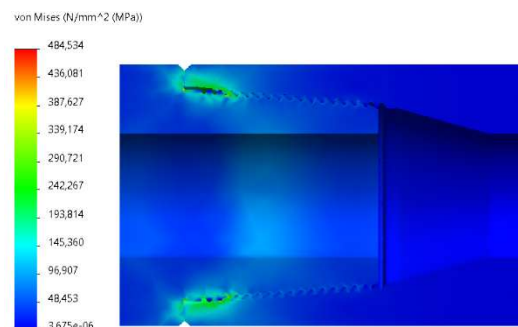


Рис. 8. Розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі ЗРЗ (від дії моменту згвинчування)

Для порівняння розподілу еквівалентних напружень по впадинах витків ніпеля при дії навантаження, а саме прикладання до ЗРЗ тільки

моменту згинчування та моменту згинчування і температури побудовано графічні залежності, які наведені на рисунку 9.

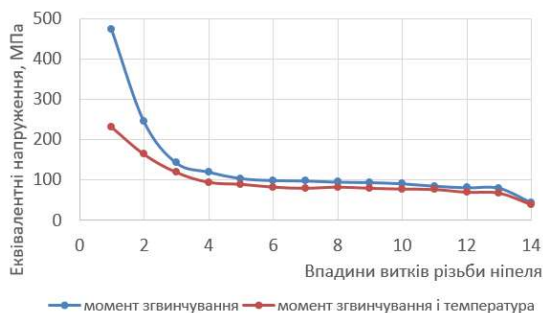


Рис. 9. Розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків різьби ніпеля

Виходячи з отриманих результатів, спостерігається вплив температури на розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків різьби ніпеля, а саме зниження їх величини на 15-19%. Найбільше зниження еквівалентних напружень спостерігається у перших двох витках ніпеля.

Зниження величин еквівалентних напружень вплине на втомну міцність ЗРЗ, визначення якої буде предметом подальших досліджень.

Висновки. Встановлений розподіл температур у замковому різьбовому з'єднанні при температурі бурового розчину 20 °С всередині та 100 °С зовні дозволив візуалізувати температурний градієнт у тілі труби та ЗРЗ.

Проведений аналіз напружено-деформованого стану ЗРЗ при дії моменту згинчування з урахуванням фізичних характеристик матеріалу та коефіцієнта тертя між елементами з'єднання дозволив встановити розподіл еквівалентних напружень по впадинах витків ЗРЗ. Отриманий розподіл напружень добре узгоджується із відомими теоріями, та згідно нього найбільше навантаження сприймає декілька витків ніпеля, а на інших витках напруження залишаються майже однаковими.

Визначено напружено-деформований стан ЗРЗ при дії на нього моменту згинчування та температури, яка виходячи з попередніх досліджень розподіляється нерівномірно.

Порівняння розподілу еквівалентних напружень при врахуванні градієнту температури та моменту згинчування показало зниження їх величин на 15-19% порівняно із прикладанням до ЗРЗ тільки моменту згинчування, що свідчить про суттєвий вплив температурного поля на напружений стан ЗРЗ. Зниження напружень спостерігається у перших

двох витках ніпеля, що може позитивно вплинути на довговічність і втомну міцність з'єднання, проте може його знизити герметичність.

Отримані результати підкреслюють необхідність врахування температурного впливу при оцінці міцності ЗРЗ, а визначення втомної міцності й її подальший аналіз будуть предметом майбутніх досліджень.

Література

1. Копей Б.В., Лях М.М. Нафтогазове обладнання: у 11 т. / За заг. ред. Б.В. Копей. Т. 2 Розрахунок, конструювання, монтаж та експлуатація машин та обладнання для спорудження свердловин: підручник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 612 с.
2. Фафлей О. Я., Михайлюк В. В., Дейнега Р. О., Мельник В. О., Шатан М. В., Пригоровський О. В. Дослідження впливу розміщення основної площини різьби на напружено-деформований стан замкового різьбового з'єднання елементів бурильної колони. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2021. № 2(51). С. 66–72. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2\(51\)-66-72](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-66-72)
3. P. Towarnicki & R. Grzejda (2018) Analysis of the impact of temperature load on the state of stress in a bolted flange connection. *International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPHDW)*, Świnouście, Poland. 2018. pp. 96-98. DOI: <https://doi.org/10.1109/IIPHDW.2018.8388333>
4. Yu, Q., Zhou, H., Yu, X., & Yang, X. (2018). High-Temperature Low Cycle Fatigue Life Prediction and Experimental Research of Pre-Tightened Bolts. *Metals*, 8(10), 828. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8100828>
5. Guangjie, Y., Zhenqiang, Y., Qinghua, W., & Zhentong, T. Numerical and experimental distribution of temperature and stress fields in API round threaded connection. *Engineering Failure Analysis*, 2006, 13, p. 1275–1284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.11.006>
6. API-7G-2. Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits. Washington: API Publishing Services, 2003. 30 p.
7. Артım В.І., Фафлей О. Я., Дейнега Р.О., Михайлюк В. В. Дослідження впливу конструктивних елементів двоопорних замкових з'єднань бурильних труб на їх напружено-деформований стан. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 4. С. 77-87.

References

1. Kopei B.V., Liakh M.M. Naftohazove obladnannia: u 11 t. / Za zah. red. B.V. Kopeia. T. 2 Rozrakhunok, konstruiuvannia, montazh ta ekspluatatsiia mashyn ta obladnannia dlia sporudzhennia sverdlolvyn: pidruchnyk. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2021. 612 p.
2. Faflei O. Ya., Mykhailiuk V. V., Deineha R. O., Melnyk V. O., Shatan M. V., Pryhorovskiy O. V. Doslidzhennia vplyvu rozmishchennia osnovnoi ploshchyny rizby na napruzhenno-deformovanyi stan zamkovoho rizbovoho ziednannia elementiv burylnoi kolony. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2021. № 2(51). P. 66–72. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2\(51\)-66-72](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-66-72).
3. P. Towarnicki & R. Grzejda (2018) Analysis of the impact of temperature load on the state of stress in a bolted flange connection. *International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPHDW)*, Świnouście, Poland. 2018. pp. 96-98. DOI: <https://doi.org/10.1109/IIPHDW.2018.8388333>.
4. Yu, Q., Zhou, H., Yu, X., & Yang, X. (2018). High-Temperature Low Cycle Fatigue Life Prediction and Experimental Research of Pre-Tightened Bolts. *Metals*, 8(10), 828. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8100828>
5. Guangjie, Y., Zhenqiang, Y., Qinghua, W., & Zhentong, T. Numerical and experimental distribution of temperature and stress fields in API round threaded connection. *Engineering Failure Analysis*, 2006, 13, p. 1275–1284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.11.006>
6. API-7G-2. Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits. Washington: API Publishing Services, 2003. 30 p.
7. Artym V.I., Faflei O. Ya., Deineha R.O., Mykhailiuk V. V. Doslidzhennia vplyvu konstruktyvnykh elementiv dvoopornykh zamkovykh ziednan burylnykh trub na yikh napruzhenno-deformovanyi stan. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysheh*. 2017. № 4. P. 77-87.

Artym V.I., Novoselskyi B. A. Study of temperature distribution in the locked threaded connection of drill pipes

The effect of temperature on threaded connections is one of the important factors affecting their strength, tightness, and durability during operation. At elevated

temperatures, thread materials undergo thermal expansion, which changes their geometric parameters and fits, affecting the tightening force and tightness of the connection. High temperatures contribute to plastic deformation of the surface layers of the thread, accelerated wear, and the formation of backlash, which reduces the reliability of the connection. The lock threaded connection (LTC) used in drill strings for oil and gas well construction must meet the requirements for strength, fatigue life, and tightness. For the study, a three-dimensional model of an SC with NC50 thread was constructed in accordance with the technical conditions, and its simulation modeling was performed using the finite element method (FEM) to determine the temperature distribution in the pipe body and SC at a drilling fluid temperature of 20 °C inside the pipe and 100 °C outside the pipe. It was found that the temperature distribution in the pipe body and the ZRZ is uneven. Considering the temperature distribution in the ZRZ, there is a decrease in temperature from the thrust end of the nipple to the coupling body from 70 °C to 47 °C. The obtained temperature gradient in the pipe and the ZRZ was used as input data for further analysis of the stress-strain state of the ZRZ. The distribution of stresses in the ZRZ under the action of the screw-in torque and the screw-in torque in combination with the temperature effect was established. The results of simulation modeling showed that temperature reduces the equivalent stresses in the recesses of the nipple threads by 15–19%, especially in the recesses of the first two nipple threads. This reduction in stress can have a positive effect on the fatigue strength and service life of the connection. Therefore, it is important to take temperature effects into account when designing, manufacturing, and evaluating the reliability of threaded connections, especially when drilling pipes are operated in variable temperature conditions. The next step is to study the fatigue strength effects of threaded connections, taking into account temperature effects and adjusting the calculated tightening torque.

Key words: drill string, lock threaded connection, stress-strain state, stress, temperature.

Артим Володимир Іванович – д . т . н, професор кафедри будівництва, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Новосельський Богдан Андрійович – аспірант кафедри нафтогазових машин та обладнання, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 01.09.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-24-29>

УДК 66.069.84

УДК 622

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ФЛАНЦЕВОГО З'ЄДНАННЯ

Лях М.М., Мацьків І.Р., Врюкало В.В., Яциняк І.І,
Семенчук А.В., Процюк Г.Я.

STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF FLANGE CONNECTIONS

Liakh M.M., Matskiv I.R., Vriukalo V.V., Yatsyniak I.I.,
Semenchuk A.V., Protsiuk H.Y.

Трубопровідна арматура є важливою складовою всіх трубопровідних систем, що охоплюють житлово-комунальне господарство, нафтовидобувну та нафтопереробну промисловість, хімічне виробництво, водопостачання теплових та атомних електростанцій. Особливу увагу приділяють міцності та надійності фланцевих і різьбових з'єднань, оскільки фланці забезпечують міцні, щільні та розбірні з'єднання трубопроводів. Історично розрахунок напружень у фланцевих з'єднаннях почався ще в 1927 році, а в сучасних дослідженнях застосовують метод скінченних елементів (МКЕ), що дозволяє детально моделювати їх напружено-деформований стан, прогнозувати довговічність, знос тощо. Болтові фланцеві з'єднання з прокладками широко використовуються, однак проблема герметичності залишається актуальною через вплив комбінованих навантажень, матеріалів та умов експлуатації. У багатьох роботах висвітлюються проблемні питання, які стосуються фланцевих з'єднань, зокрема проведений нелінійний аналіз з допомогою МКЕ який враховує товщину фланця, різні способи кріплення болтів, їх кількість та попередній натяг, що дозволяє оптимізувати конструкцію фланцевого з'єднання. Є розроблений алгоритм визначення максимального попереднього напруження болтів, який можна застосувати для різних типів фланцевих з'єднань. Він враховує пластичність матеріалів та контакти фланець-прокладка. У цій роботі особливий акцент робиться на фланцеві з'єднання, які застосовуються у нафтогазовій галузі для з'єднання різноманітного обладнання розміщеного як у ґрунті, так і на поверхні. При цьому сезонні зміни температури

будуть впливати на властивості ґрунту, і як наслідок, на напружено-деформований стан досліджуваних з'єднань. Для оцінки напружено-деформованого стану фланцевого з'єднання розроблено тривимірну модель, яка складається з фланцевого з'єднання, одна частина труби розміщена в ґрунті, а інша – на поверхні. Результати моделювання показали, що при осьовому навантаженні на фланцеве з'єднання виникає максимальне еквівалентне напруження величиною 141 МПа, а контактний тиск на прокладці дорівнює 9,3 МПа. При урахуванні жорсткості ґрунту, аналогічній зимовим умовам, напруження зростають до 241 МПа, водночас контактний тиск на прокладці та фланцях стає нерівномірним, що призводить до втрати герметичності з'єднання. Враховуючи поширеність таких умов, подальші дослідження рекомендовано зосередити на впливі властивостей ґрунту, коефіцієнтів тертя між ґрунтом і трубою, а також впливі вібрацій, викликаних пульсацією тиску в трубах, на міцність та герметичність фланцевих з'єднань. Це дозволить підвищити надійність трубопровідних систем у складних експлуатаційних умовах.

Ключові слова: трубопровід, фланцеве з'єднання, імітаційне моделювання, напруження, переміщення, контактний тиск.

Вступ. Трубопровідна арматура є невід'ємною частиною всіх трубопровідних систем, починаючи від житлово-комунального господарства та закінчуючи системами з підвищеними вимогами до технічної безпеки.

До систем з підвищеними вимогами до технічної безпеки належать: системи нафтовидобувних та нафтопереробних підприємств; системи водопостачання теплових електростанцій; основні контури атомної електростанції; системи у хімічному виробництві та переробці [1, 2]. У цих галузях промисловості ставляться підвищені вимоги до міцності та надійності всіх елементів арматури, а особливо фланцевих та різьбових з'єднань. Існує аналітичний метод для розрахунку напружень і переміщень у фланцевих з'єднаннях, а результати розрахунку за цим методом добре узгоджувались з результатами експериментів. Проте, на даний час для дослідження роботи фланцевих з'єднань застосовують сучасні методи, такі як метод скінченних елементів. Для цього застосовується спеціалізоване програмне забезпечення, яке окрім розрахунку напружено-деформованого стану дає можливість прогнозувати довговічність з'єднань, знос від дії абразивного середовища тощо.

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій. Болтові (шпилькові) фланцеві з'єднання з прокладками широко застосовуються в різних галузях для з'єднання труб. Алгоритми проектування, які описані в літературі, переважно зосереджуються на визначенні міцності, тоді як порушення герметичності залишається серйозною проблемою. Крім того, під час аналізу джерел інформації виявлено малу кількість робіт, що стосуються таких з'єднань, які працюють під дією комбінованого навантаження. Для вивчення міцності та герметичності фланцевих з'єднань з ущільненнями у роботі [4] проводиться їх детальний нелінійний аналіз з врахуванням різних способів кріплення болтів. Проведено параметричне дослідження поведінки фланців для визначення напруження в болтах. При цьому змінними є товщина фланця, попередній натяг болта та їх кількість, що одночасно кріплять фланець

Метою дослідження, висвітленого у праці [5] є розроблення алгоритму для визначення максимального попереднього напруження болта, необхідного для належної роботи прокладки фланцевих з'єднань. Запропонований алгоритм підходить для всіх типів фланців. Також проведено дослідження тривимірної моделі за допомогою методу скінченних елементів із врахуванням пластичної поведінки матеріалу фланця, нелінійної поведінки матеріалу прокладки та нелінійного

контакту фланець-прокладка. Крім того, в даній роботі розглядається вплив довжини прямолінійної частини втулки фланця в місці її зварного з'єднання з трубою і радіуса галтелі на переході втулка-фланець на розподіл напружень і деформацій.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання. Основна увага в даній роботі звернена на фланцеві з'єднання, які використовуються у нафтогазовій галузі. Враховуючи те, що трубопроводи знаходяться в ґрунті під відкритим небом де на них діють змінні у широкому діапазоні кліматичні умови (температура, вологість тощо), а фланцеві з'єднання сполучені з трубопроводом та іншим обладнанням і контактують з атмосферним повітрям, властивості ґрунту суттєво впливають на їх напружено-деформований стан.

Метою роботи є оцінка напружено-деформованого стану елементів фланцевого з'єднання при дії на нього осьового навантаження та з врахуванням властивостей ґрунту, в якому розміщується приєднана до фланця труба.

Для досягнення мети необхідно:

- побудувати модель фланцевого з'єднання, труби та ґрунту і задати їх характеристики;
- провести імітаційне моделювання роботи фланцевого з'єднання із врахуванням властивостей ґрунту, в якому розміщується приєднана до фланця труба;
- проаналізувати отримані результати моделювання, зробити висновки і надати рекомендації щодо покращення умов роботи фланцевого з'єднання.

Викладення основного матеріалу. З моменту експлуатації болтових фланцевих з'єднань виникають порушення герметичності, які призводять до витікання рідини чи газу. Це є серйозною проблемою, особливо коли відбувається витік у навколишнє середовище продукції нафтових та газових свердловин.

На герметичність фланцевих з'єднань впливають конструктивне його виконання, матеріали з яких виготовлено його елементи, моменти згвинчування різьбових з'єднань. Проте, окрім вищезгаданих чинників на герметичність таких з'єднань також впливають і умови навколишнього середовища, а саме зміна температури повітря, промерзання та фізичні властивості ґрунтів, у які прокладаються трубопроводи, вібрації спричинені пульсацією тиску рідини чи газу тощо.

З метою визначення напружено-деформованого стану фланцевого з'єднання розроблено його тривимірну модель, яку показано на рисунку 1. У цій моделі окрім фланцевого з'єднання є фрагмент трубопроводу частина якого розміщена на поверхні ґрунту, а частина – в ґрунті. На рисунку 2 показано модель фланцевого з'єднання (шип-паз) яке побудовано відповідно [5]. Особливістю під час моделювання цього з'єднання є те, що різьбові з'єднання замінені на циліндри, до яких в подальшому буде прикладатись осьове навантаження для імітації осьового навантаження (для стискування прокладки).

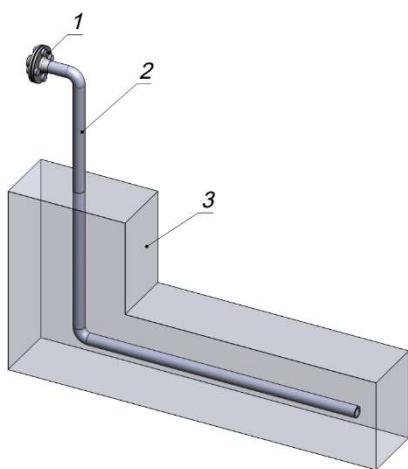


Рис. 1. Модель для дослідження фланцевого з'єднання: 1 – фланцеве з'єднання; 2 – труба; 3 – ґрунт

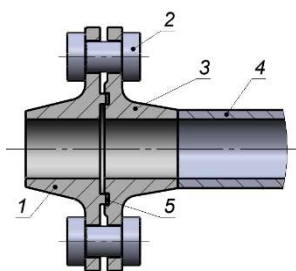


Рис. 2. Фланцеве з'єднання:
1 – фланець з кільцевим шипом; 2 – шпилькове (болтове) з'єднання; 3 – фланець з кільцевим пазом; 4 – труба

Властивості матеріалів, які використані під час імітаційного моделювання наведено у таблиці 1.

Перед проведенням розрахунку модель для дослідження розбита на сітку скінченних елементів, яку показано на рисунку 3.

Таблиця 1

Властивості матеріалів

№ з/п	Матеріал	Модуль Юнга, Па	Коефіцієнт Пуассона
1	Сталь	200000000000	0,26
2	Фторопласт-4	833565250	0,2
3	Ґрунт	2900000	0,4

Всі наведені цифрові значення є умовними, але знаходяться у межах реальних, отриманих із практичних спостережень.

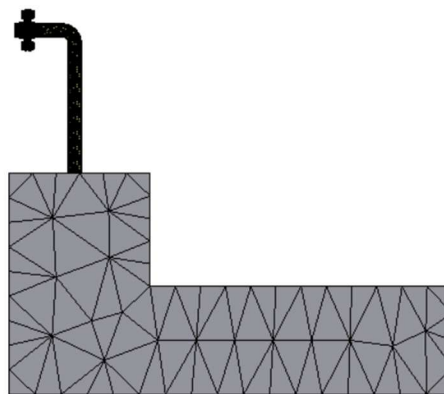


Рис. 3. Сітка скінченних елементів

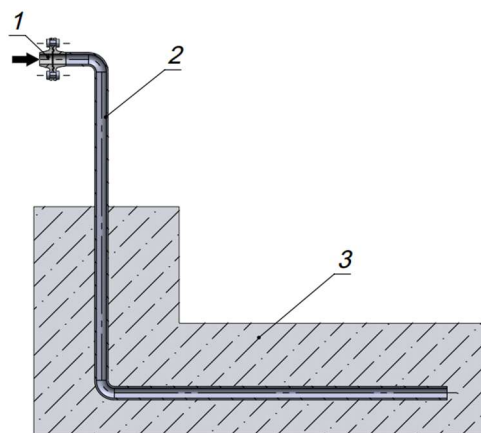


Рис. 4. Розрахункова схема:
1 – різьбове фланцеве з'єднання; 2 – труба; 3 – ґрунт

Згідно розрахункової схеми (рис. 4) на фланцеве з'єднання діє переміщення в горизонтальному напрямку по осі трубопроводу на величину 8 мм (напрямок дії показано стрілкою). Контакт між деталями фланцевого з'єднання прийнято з коефіцієнтом тертя 0,2. Щодо визначення контактного тиску на поверхнях контакту фланців та прокладки застосовано наступний підхід. Спочатку фланцеве з'єднання досліджується окремо тільки за дії осьового зусилля на прокладку, яке обумовлене навантаженням на болтове (шпилькове) з'єднання. Оскільки фланцеве

з'єднання розраховане на тиск 6,3 МПа, на контактних поверхнях фланців та прокладки. Контактний тиск для забезпечення герметичності повинен бути більшим за робочий у 1,5 рази. Після визначення сил на шпильках при якій досягається необхідний контактний тиск на прокладці, продовжуються дослідження цілої моделі. Будуть враховуватись як зусилля на фланцях, так і переміщення фланцевого з'єднання.

На рисунку 5 показано розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі фланцевого з'єднання. Контактний тиск на прокладці та фланцях показаний на рисунку 6.

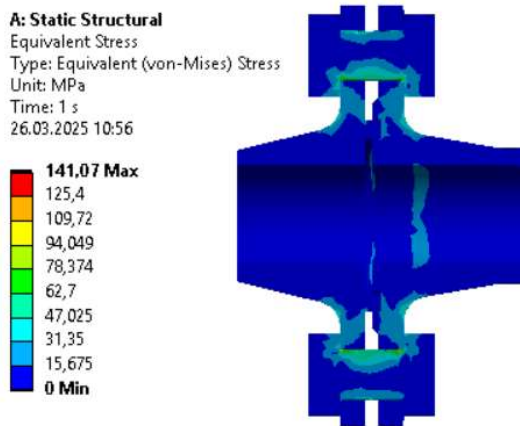


Рис. 5. Розподіл еквівалентних напружень у поздовжньому перерізі фланцевого з'єднання

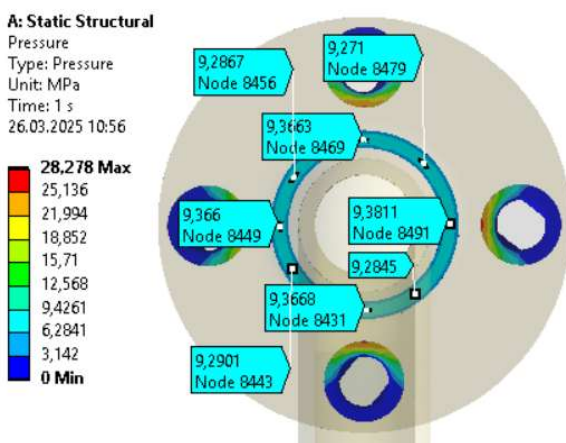


Рис. 6. Розподіл контактного тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка»

Отже, при дії на фланцеве з'єднання тільки осевого навантаження від шпильок у ньому виникає максимальне еквівалентне напруження величиною 141 МПа, яке

концентрується у шпильковому з'єднанні. Щодо розподілу контактного тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка», то на рисунку 6 показано його величини у конкретних точках. Величина контактного тиску на поверхні контакту складає 9,3 МПа.

На наступному етапі дослідження проведено імітаційне моделювання всієї моделі з врахуванням того, що ґрунт є абсолютно жорстким та взаємодіє з трубою, яка розміщена в ньому як одне ціле. Тобто ґрунт та труба в ньому є неподатливими. Жорсткий-неподатливий ґрунт в основному буде у зимових умовах за низьких температур. Переміщення торця фланця у горизонтальному напрямку за досліджуваних умов складають 4 мм.

Отримані результати імітаційного моделювання, наведені на рисунках 7 та 8 відображають розподіл еквівалентних напружень та переміщення елементів досліджуваної моделі відповідно. Рисунок 7 демонструє концентрації напружень у критичних зонах, а рисунок 8 – деформації та напрямки зміщень.

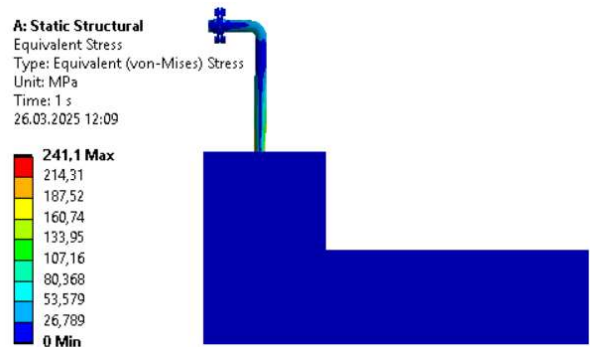


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень у досліджуваній моделі

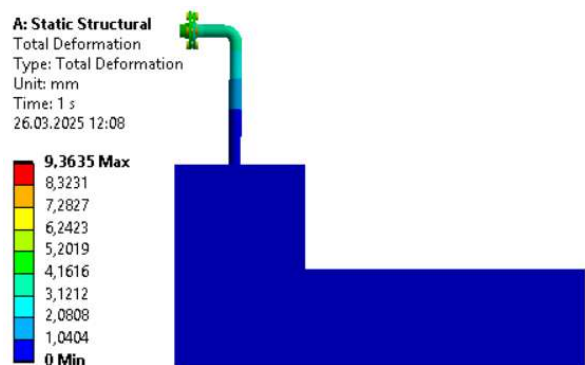


Рис. 8. Переміщення елементів досліджуваної моделі

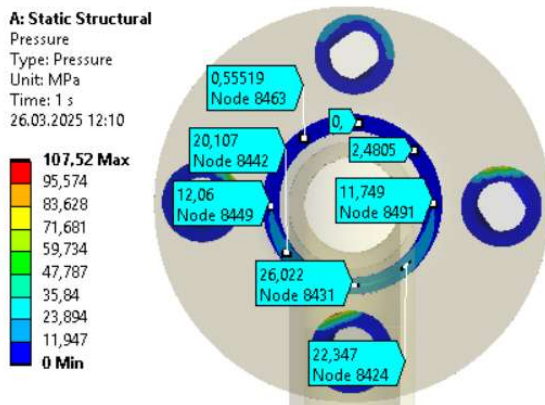


Рис. 9. Розподіл контактної тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка»

Отже, за такої схеми навантаження максимальні еквівалентні напруження у моделі становлять 241 МПа, а переміщення 9,3 мм. При цьому відбувається перерозподіл контактної тиску на поверхні контакту «фланець-прокладка», з однієї сторони він зростає до 22 МПа, а з іншої знижується до 0 МПа. Це вказує на втрату герметичності такого з'єднання.

Оскільки за вищенаведеною схемою працює доволі багато трубопроводів та фланцевих з'єднань, то доцільно в подальшому провести дослідження впливу властивостей ґрунту на напружено-деформований стан фланцевого з'єднання, а також коефіцієнтів тертя між ґрунтом та трубою. Проте, окрім вищезгаданих чинників на герметичність таких з'єднань також впливають вібрації, що спричинені пульсацією тиску рідини чи газу, які в подальшому доцільно дослідити та врахувати під час проектування фланцевих з'єднань.

Висновки. Для дослідження напружено-деформованого стану фланцевого з'єднання побудовано його тривимірну модель, трубу та ґрунт. Для цих елементів задано відповідні механічні характеристики.

Дослідження показали, що при дії лише осьового навантаження від шпильок у фланцевому з'єднанні виникає максимальне еквівалентне напруження 141 МПа, яке концентрується у шпильковому з'єднанні, а контактний тиск на поверхні «фланець-прокладка» складає 9,3 МПа. При моделюванні з урахуванням жорсткості ґрунту, що діє як неподатливе середовище (характерне для зимових умов), максимальні напруження зростають до 241 МПа, а контактний тиск на прокладці нерівномірно перерозподіляється – з однієї сторони зростає до 22 МПа, з іншої знижується до 0 МПа, що свідчить про втрату

герметичності з'єднання. З огляду на поширеність таких умов експлуатації, рекомендується подальше вивчення впливу властивостей ґрунту та коефіцієнтів тертя між ґрунтом і трубою на напружено-деформований стан з'єднання. Також важливо враховувати вплив вібрацій, спричинених пульсацією тиску робочих середовищ, для підвищення надійності та герметичності фланцевих з'єднань під час їх проектування та експлуатації.

Література

1. Федорович Я. Т. Нафтогазопромислові машини і комплекси: навчальний посібник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 229 с.
2. Лях М. М. Монтаж бурового і нафтогазопромислового обладнання: конспект лекцій. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 126 с.
3. Khan NB, Abid M, Jameel M, Wajid HA. Joint strength of gasketed bolted pipe flange joint under combined internal pressure plus axial load with different (industrial and ASME) bolt-up strategy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2015. 231(3): P. 555-564. <https://doi.org/10.1177/0954408915614460>
4. Muhammed Elkhlaidy, Alberto Carnicero, Ricardo Perera Influence of flange geometric configuration and bolt stress on joint integrity during assembly using FEA *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2023. Vol. 202, P. 104912 <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104912>.
5. ДСТУ ISO 7005-1:2005. Металеві фланці. Частина 1. Сталеві фланці (ISO 7005-1:1992, IDT). – Чинний від 2006-07-01. – Київ: Держспоживстандарт України, 2006. – 38 с.

References

1. Fedorovych Ya. T. Naftohazopromyslovi mashyny i kompleksi: navchalnyi posibnyk. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2020. 229 p.
2. Liakh M. M. Montazh burovoho i naftohazopromyslovooho obladnannia: konspekt lektzii. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2021. 126 p.
3. Khan NB, Abid M, Jameel M, Wajid HA. Joint strength of gasketed bolted pipe flange joint under combined internal pressure plus axial load with different (industrial and ASME) bolt-up strategy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2015. 231(3): P. 555-564. <https://doi.org/10.1177/0954408915614460>
4. Muhammed Elkhlaidy, Alberto Carnicero, Ricardo Perera Influence of flange geometric configuration and bolt stress on joint integrity during assembly using FEA *International Journal of Pressure*

Vessels and Piping. 2023. Vol. 202, P. 104912
<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104912>.

5. DSTU ISO 7005-1:2005. Metalevi flantsi. Chasty-na 1. Stalevi flantsi (ISO 7005-1:1992, IDT). – Chynnyi vid 2006-07-01. – Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2006. – 38 p.

Liakh M.M., Matskiv I.R., Vriukalo V.V., Yatsyniak I.I., Semenchuk A.V., Protsiuk H.Y. Study of the stress-strain state of flange connections

Pipe fittings are an important component of all piping systems covering housing and communal services, oil production and refining, chemical production, water supply to thermal and nuclear power plants. Particular attention is paid to the strength and reliability of flanged and threaded connections, as flanges provide strong, tight, and detachable pipe connections. Historically, the calculation of stresses in flange connections began as early as 1927, and modern research uses the finite element method (FEM), which allows detailed modeling of their stress-strain state, predicting durability, wear, etc. Bolted flange connections with gaskets are widely used, but the problem of tightness remains relevant due to the influence of combined loads, materials, and operating conditions. Many studies highlight problematic issues related to flange connections, in particular, a nonlinear analysis using FEM that takes into account the thickness of the flange, various methods of fastening bolts, their number and preload, which allows optimizing the design of the flange connection. An algorithm has been developed to determine the maximum preliminary bolt tension that can be applied to various types of flange connections. It takes into account the plasticity of materials and flange-gasket contacts. This work focuses on flange connections used in the oil and gas industry to connect various equipment located both in the ground and on the surface. Seasonal temperature changes will affect the properties of the soil and, as a result, the stress-strain state of the connections under study. To assess the stress-strain state of a flange connection, a three-dimensional model was developed, consisting of a flange connection with one part of the pipe located in the ground and the other on the surface. The

simulation results showed that under axial loading, the flange connection experiences a maximum equivalent stress of 141 MPa, and the contact pressure on the gasket is 9.3 MPa. When taking into account soil stiffness similar to winter conditions, stresses increase to 241 MPa, while contact pressure on the gasket and flanges becomes uneven, leading to a loss of joint tightness. Given the prevalence of such conditions, further research should focus on the influence of soil properties, friction coefficients between the soil and the pipe, and the influence of vibrations caused by pressure pulsations in pipes on the strength and tightness of flange connections. This will improve the reliability of pipeline systems in difficult operating conditions.

Key words: pipeline, flange connection, simulation modeling, stress, displacement, contact pressure.

Лях Михайло Михайлович – к. т. н, професор кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Мацьків Ігор Романович – аспірант кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Врюкало Віктор Володимирович – к. т. н, доцент кафедри кафедра комп'ютеризованого машинобудування Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Яциняк Іван Ігорович – к. т. н, доцент кафедри інформаційних технологій та програмування, Івано-Франківська філія Університету “Україна”

Семенчук Андрій Васильович – канд. фіз-мат. наук, доцент кафедри фізико-математичних наук Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Процюк Галина Ярославівна – асистент кафедри інженерії програмного забезпечення, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 04.09.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-30-38>

УДК 621

IMPROVING THE RELIABILITY OF LOCOMOTIVE ELECTRICAL POWER DEVICES BY ENHANCING CONTACT JOINTS

Spivak O.M., Ivanchenko S.S., Melkonova I.V. Melkonov H.L.

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИЛОВИХ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ

Співак О.М., Іванченко С.С., Мелконова І.В., Мелконов Г.Л.

In modern railway transport, the reliability of electrical power devices is a key factor in ensuring the safety and efficiency of locomotive operation. The uninterrupted performance of systems such as traction motors, converters, and protection relays directly influences the stability of train movement and passenger safety.

Among the critical components of these systems are electrical contact joints, which are commonly used in switching devices such as contactors and circuit breakers. These joints are regularly subjected to significant electrical and mechanical stresses, including high current switching, thermal cycling, and vibration, all of which contribute to contact wear and eventual failure.

The degradation of contact surfaces leads to increased contact resistance, reduced conductivity, and a higher likelihood of arc formation, ultimately compromising the overall functionality of the power system. Therefore, improving the durability and electrical performance of contact joints is an essential objective in the development of more reliable locomotive power systems.

This study focuses on identifying effective strategies to improve contact joint reliability by analyzing contact materials, modeling key operational parameters such as contact resistance and failure probability and evaluating modern material technologies. Particular attention is given to the use of composite and nanostructured materials, which offer enhanced mechanical strength, erosion resistance, and compliance with international environmental standards.

To overcome the limitations associated with large-scale experimental testing, the research relies primarily on analytical methods supported by data from existing literature. This approach allows for the theoretical assessment of material performance and the identification of optimal solutions for practical implementation in railway systems.

Contact components used in the switching of electrical

circuits have a significant impact on the performance and reliability of this equipment. This paper presents a study aimed at improving the operational reliability and mean time between failures of locomotive traction electromagnetic contactors by enhancing the stability of their contact characteristics. Due to the high cost and complexity of conducting large-scale experimental research, the emphasis is placed on analytical methods and the study of the properties of the materials used, proposing potential improvements based on available technologies and materials in accordance with international standards and current widespread innovations.

Keywords: *reliability, electrical power devices, locomotives, contact joints, electromagnetic contactors, contact resistance, international standards, innovative materials, composite materials, nanostructured materials.*

Introduction. In modern railway transport, the reliability of electrical power devices is a key factor in ensuring the safety and efficiency of locomotive operation [1]. The uninterrupted performance of systems such as traction motors, converters, and protection relays directly influences the stability of train movement and passenger safety.

Among the critical components of these systems are electrical contact joints, which are commonly used in switching devices such as contactors and circuit breakers. These joints are regularly subjected to significant electrical and mechanical stresses, including high current switching, thermal cycling, and vibration, all of which contribute to contact wear and eventual failure [2].

The degradation of contact surfaces leads to increased contact resistance, reduced conductivity, and a higher likelihood of arc formation, ultimately compromising the overall functionality of the power system. Therefore, improving the durability and electrical performance of contact joints is an essential objective in the development of more reliable locomotive power systems.

This study focuses on identifying effective strategies to improve contact joint reliability by analyzing contact materials, modeling key operational parameters such as contact resistance and failure probability and evaluating modern material technologies. Particular attention is given to the use of composite and nanostructured materials, which offer enhanced mechanical strength, erosion resistance, and compliance with international environmental standards.

To overcome the limitations associated with large-scale experimental testing, the research relies primarily on analytical methods supported by data from existing literature. This approach allows for the theoretical assessment of material performance and the identification of optimal solutions for practical implementation in railway systems.

Research results. Analysis of Contact Node Failure Causes. The operational reliability of electrical contacts in locomotive switching devices is significantly influenced by a variety of degradation mechanisms that act individually or in combination during the service life of the equipment. Understanding these failure causes is essential for the development of more durable and efficient contact materials.

The main causes of contact node failures include the following:

- Contact erosion: During switching operations, the contact surfaces are exposed to high-temperature electric arcs that lead to localized melting, pitting, and material loss. Repeated arc exposure degrades the surface integrity and reduces the effective contact area [3].

- Oxidation: Environmental exposure and elevated temperatures promote the formation of oxide layers on the contact surface. These non-conductive films increase the contact resistance and reduce current-carrying efficiency [4].

- Mechanical wear: Frequent switching cycles and mechanical vibrations lead to frictional wear of the contact surfaces. This results in surface roughness, reduced alignment, and uneven pressure distribution, ultimately degrading performance [4].

- Thermal overheating: High current densities and poor heat dissipation can cause localized overheating. This thermal stress not only

accelerates oxidation and softens the contact material but may also cause microstructural degradation and deformation [5].

- Improper contact force: Both insufficient and excessive contact pressure negatively impact reliability. Low force results in unstable electrical contact and arcing, while excessive force causes mechanical deformation and accelerates wear of the contact surfaces.

Table 1 presents the key factors affecting the reliability of contact nodes.

Table 1

Main Factors Contributing to Contact Node Failures

Factor	Description	Impact on Reliability
Contact erosion	Destruction of the contact surface due to electric arcs	Decrease in contact integrity and lifespan
Oxidation	Formation of oxides on the contact surface	Increased contact resistance
Mechanical wear	Material loss due to friction and vibration	Surface degradation and reduced durability
Thermal overheating	Localized heating from resistive losses	Microstructural damage, increased failure risk
Improper contact force	Insufficient or excessive contact pressure	Instability, arcing, mechanical damage

Limitations of Experimental Studies. Experimental research on electrical contact joints in locomotive power systems poses significant challenges, both from technical and economic perspectives. While laboratory testing provides valuable data, it is often impractical as the primary method of investigation at early design stages. Several key limitations hinder the widespread implementation of large-scale experimental studies.

First, the cost of conducting controlled tests is considerably high. This includes the procurement of specialized contact materials, high-current switching equipment, thermal monitoring tools, and arc simulation platforms. Additionally, high-power test benches with accurate force control and real-time diagnostics are required to replicate realistic switching conditions.

Second, replicating real-world operating environments such as variable mechanical loads, high humidity, contamination, and long-term thermal cycling requires the development of sophisticated and often custom-built test rigs. These setups must account for both electrical and

mechanical stressors that occur simultaneously during actual locomotive operation.

Third, achieving statistically meaningful results necessitates a high number of repetitive test cycles. Since contact degradation is a stochastic process influenced by multiple variables (e.g., force, temperature, material inhomogeneity), a large sample size is required to draw reliable conclusions. This further increases time, labor, and cost.

Given these constraints, this study focuses on analytical methods as a feasible alternative during the preliminary stages of material selection and contact design. By utilizing validated theoretical models and performance data from existing literature, it becomes possible to estimate contact behavior, predict failure modes, and evaluate the long-term reliability of different material systems without the need for extensive physical testing.

This approach enables cost-effective decision-making and supports the identification of optimal solutions for improving contact joint performance using accessible and environmentally compliant materials and technologies.

Modern International Standards and Technologies. According to international standards such as IEC 60947 and IEEE C37.016, it is essential to use materials and technologies that ensure high reliability and durability of contact joints [6], [7].

Modern Materials for Contact Joints. Silver–cadmium oxide (AgCdO) and silver–tin oxide (AgSnO₂) are composite materials consisting of a silver matrix with dispersed cadmium or tin oxide particles [8], [9]. These materials combine the high electrical conductivity of silver with enhanced mechanical properties and erosion resistance provided by the oxide particles.

Silver–nickel alloy (AgNi) is typically considered an alloy, but under certain manufacturing conditions, it may exhibit a structure similar to a composite, where nickel forms dispersed phases within the silver matrix [10].

Composite and Nanostructured Materials. The use of composite materials with nanostructured fillers allows for enhanced contact properties [11].

Nanostructuring of AgSnO₂ and AgNi is a modern approach to improving their mechanical and electrical characteristics.

AgSnO₂ with nano-sized tin oxide particles demonstrates increased resistance to erosion and welding, along with improved electrical conductivity [9], [11].

Nanostructured AgNi exhibits improved hardness and wear resistance, contributing to the longevity of contact joints [10], [11].

Recommendations for Improving Contact Joints. Transitioning to environmentally friendly and nanostructured materials such as AgSnO₂ and AgNi will contribute to enhanced reliability and durability of contact joints, as well as compliance with international standards and environmental regulations [13].

Multilayer contact materials represent a promising direction for improving electrical contacts. These materials consist of multiple layers of different substances, combining their best properties [14].

The structure of multilayer contacts may include:

- Base layer: high electrical conductivity (e.g., silver or copper);
- Intermediate layers: materials that provide mechanical strength and erosion resistance (e.g., nickel or molybdenum);
- Surface layer: wear-resistant and corrosion-resistant materials (e.g., silver-based nanocomposites with metal oxides).

Nanocomposite contact materials contain nanoscale particles uniformly distributed within the matrix of the base material. This enables achieving unique properties not found in traditional materials [11].

Table 2

Comparative Characteristics of Contact Materials

Material	Electrical Conductivity, σ , S/m	Hardness, HV	Erosion Resistance	Environmental Friendliness
AgCdO	6.3×10^7	80	High	Low
AgSnO ₂	6.1×10^7	85	High	High
AgNi	6.2×10^7	90	Medium	High

Advantages of nanocomposites include:

- Increased hardness and wear resistance due to nanoscale particles reinforcing the matrix;
- Improved electrical conductivity owing to a more uniform structure and reduced defects;
- Enhanced resistance to erosion and contact welding due to altered surface properties.

Practical Application:

AgSnO₂ nanocomposites involve the incorporation of nanosized SnO₂ particles into the silver matrix. This improves the distribution of oxide phases, which enhances erosion resistance and reduces contact welding [9], [11].

Applications include contactors and circuit breakers where high switching capacity and long service life are essential.

AgNi nanocomposites benefit from nano structuring that improves mechanical properties such as hardness and strength without significantly compromising electrical conductivity [10], [11].

Applications include high-frequency and high-load contacts where fast response and wear resistance are critical.

Multilayer nanocomposite contacts combine different nanocomposite layers to optimize contact properties for specific operating conditions [14].

Example structure:

- Base layer: high-conductivity material (Ag);
- Intermediate layer: AgNi nanocomposite for reinforcement;
- Surface layer: AgSnO₂ nanocomposite to increase erosion resistance.

Physical Vapor Deposition (PVD) enables the application of thin multilayer coatings with precise control over layer thickness and composition [15].

Advantages include high purity of coatings and the ability to form nanostructures.

Electrolytic Deposition is used for applying nanocomposite layers with controlled composition [15].

Its advantages are relative simplicity of the process and scalability for industrial production.

Mechanical Alloying is a method for producing nanocomposite materials through mechanical mixing and deformation of powder components [12].

It enables the creation of uniform nanocomposites with high particle dispersion.

Application Prospects:

- Improved reliability and durability of contact joints in locomotive electrical power devices;
- Reduced maintenance and replacement costs due to enhanced wear and erosion resistance;

- Compliance with environmental standards through the use of cadmium-free materials.

Section Conclusion:

Multilayer and nanocomposite contact materials provide a technologically advanced solution for enhancing the reliability, conductivity, and environmental safety of locomotive power contacts. Their structure allows targeted performance improvements, while modern production technologies ensure industrial scalability.

Modern environmental regulations demand that electrical equipment meet not only technical but also chemical safety standards. One of the most important is Directive 2011/65/EU (RoHS 2), which restricts the use of ten hazardous substances, including cadmium (Cd), limiting its presence to 0.01% by weight in any homogeneous material.

Silver-cadmium oxide (AgCdO), long used in electrical contact components due to its excellent arc resistance, contains cadmium and therefore falls under the restrictions of RoHS. Its use is only permitted under specific exemptions, such as exemption 8(b) listed in Annex III, which allows cadmium use in electrical contacts when no viable alternative exists.

In the context of railway applications:

- Locomotives may partially fall outside the RoHS scope if considered large-scale stationary industrial tools, as outlined in Article 2(4).
- However, electrical components marketed separately or serviceable as spare parts are generally subject to RoHS, including cadmium content limitations.

Therefore, manufacturers of locomotive electrical contacts must:

- Verify whether exemption 8(b) applies, and document its justification;
- If not applicable, ensure compliance with the cadmium threshold (<0.01%) or switch to cadmium-free materials such as AgSnO₂ or AgNi.
- Additionally, adopting environmentally compliant materials:
 - Simplifies certification for EU markets;
 - Reduces legal and regulatory risks;

Table 3 presents a comparison of the RoHS compliance status for AgCdO, AgSnO₂, and AgNi, summarizing their cadmium content, regulatory restrictions, and environmental acceptability under Directive 2011/65/EU.

Strengthens the manufacturer's image as an environmentally responsible supplier. The application of multilayer and nanocomposite contact materials opens new opportunities for improving the characteristics of electrical contacts.

Table 3

Material Compliance Under RoHS Directive 2011/65/EU

Material	Contains Cadmium	RoHS Restricted	Allowed via Exemption	Environmentally Friendly
AgCdO	Yes	Yes	Yes (8b)	No
AgSnO ₂	No	Yes	Not needed	Yes
AgNi	No	Yes	Not needed	Yes

Table 4

Calculated Contact Resistance Values for Different Materials

Contact Force F (N)	AgCdO: R _c (Ω)	AgSnO ₂ : R _c (Ω)	AgNi: R _c (Ω)
10	0,002	0,001	0,0005
20	0,001	0,0005	0,00025
30	0,000666667	0,000333333	0,000166667
40	0,0005	0,00025	0,000125
50	0,0004	0,0002	0,0001
60	0,000333333	0,000166667	8,33333E-05
70	0,000285714	0,000142857	7,14286E-05
80	0,00025	0,000125	0,0000625
90	0,000222222	0,000111111	5,55556E-05
100	0,0002	0,0001	0,00005

This approach simultaneously increases the reliability, efficiency, and environmental sustainability of locomotive power devices, representing a significant step forward in the development of modern railway transport.

Mathematical Modeling and Analysis:

Modeling of Contact Resistance. Contact resistance R_c is a critical parameter that affects the efficiency and reliability of electrical contacts. It depends on the material properties, contact force, and contact geometry. For modeling contact resistance, the following formula is used [16]:

$$R_c = k/F$$

where: R_c — contact resistance (Ω);

F — contact force (N);

k — proportionality coefficient, which depends on the material and geometric features of the contact (Ω·N).

Selection of k Coefficients for Different Materials. For the three considered contact materials, the following k coefficients were selected based on their physical properties and literature data [4], [16]:

AgCdO: k = 0,02 Ω·N;

AgSnO₂: k = 0,01 Ω·N;

AgNi: k = 0,005 Ω·N.

Justification for k Selection

AgCdO has the highest k value due to its greater hardness and lower plasticity, which results in a smaller real contact area under a given contact force.

AgSnO₂ has an intermediate k value, as its properties allow for the formation of a larger contact area.

AgNi is characterized by the lowest k value due to its high plasticity and electrical conductivity, which provide the lowest contact resistance.

The contact resistance calculations were performed for contact forces F ranging from 10 N to 100 N, in increments of 10 N.

Example calculation for F=10N:

For AgCdO:

$$R_c = \frac{k}{F} = \frac{0,02}{10} = 0,002 \Omega.$$

• For AgSnO₂:

$$R_c = \frac{0,01}{10} = 0,001 \Omega.$$

• For AgNi:

$$R_c = \frac{0,005}{10} = 0,0005 \Omega.$$

The results of the calculations are summarized in table 4.

Graph Construction. Based on the obtained data, a graph was constructed showing the dependence of contact resistance on contact force for different materials (Figure 1).

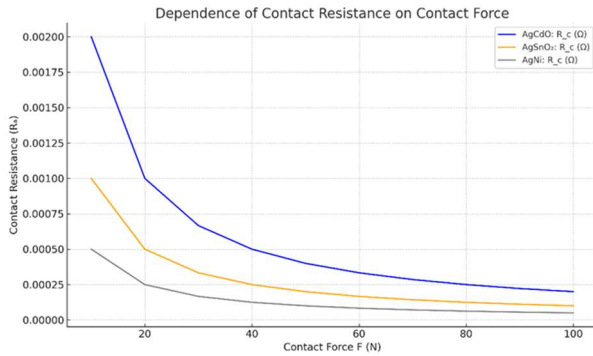


Fig. 1. Dependence of Contact Resistance on Contact Force for Different Material

Analysis of Results. The graph shows that as the contact force F increases, the contact resistance Rc decreases for all materials. This is explained by the fact that greater contact force ensures better contact between surfaces, increasing the real contact area [16].

When comparing the materials, it is evident that:

- AgNi exhibits the lowest contact resistance at any contact force, indicating its advantages for use in electrical contacts to reduce losses and increase efficiency;
- AgSnO₂ holds an intermediate position, demonstrating better characteristics than AgCdO;
- AgCdO shows the highest contact resistance, making it a less efficient and less environmentally friendly choice.

Reliability of Contact Joints. The reliability R(t) of a component is defined as the probability of failure-free operation over time t.

To model reliability, the exponential distribution law is used [18]:

$$R(t) = e^{-\lambda t},$$

where: R(t) — reliability at time t (hours);
 λ — failure rate for the specific material (1/hour);
 t — operating time (hours).

Selection of Failure Rates λ for Different Materials. Based on literature data [4], [18], the following failure rates were adopted:

$$\begin{aligned} AgCdO: \lambda &= 1 \times 10^{-5} h^{-1}; \\ AgSnO_2: \lambda &= 5 \times 10^{-6} h^{-1}; \\ AgNi: \lambda &= 2 \times 10^{-6} h^{-1}. \end{aligned}$$

Reliability Calculation. The reliability was calculated for an operating time range from 0 to 100,000 hours with a step of 10,000 hours.

Example calculation for t=10,000 hours:

- For AgCdO:

$$R(10\ 000) = e^{-1 \times 10^{-5} \times 10\ 000} = e^{-0.1} \approx 0.9048.$$

- For AgSnO₂:

$$R(10\ 000) = e^{-5 \times 10^{-6} \times 10\ 000} = e^{-0.05} \approx 0.9512.$$

- For AgNi:

$$R(10\ 000) = e^{-2 \times 10^{-6} \times 10\ 000} = e^{-0.02} \approx 0.9802.$$

The results of the reliability calculations are summarized in Table 5.

Based on the obtained data, a reliability graph was plotted for contact materials (Figure 2).

Table 5

Calculated Reliability Values for Different Materials

Time t (hours)	AgCdO: R(t)	AgSnO ₂ : R(t)	AgNi: R(t)
0	1	1	1
10000	0,904837418	0,951229425	0,980198673
20000	0,818730753	0,904837418	0,960789439
30000	0,740818221	0,860707976	0,941764534
40000	0,670320046	0,818730753	0,923116346
50000	0,60653066	0,778800783	0,904837418
60000	0,548811636	0,740818221	0,886920437
70000	0,496585304	0,70468809	0,869358235
80000	0,449328964	0,670320046	0,852143789
90000	0,40656966	0,637628152	0,835270211
100000	0,367879441	0,60653066	0,818730753

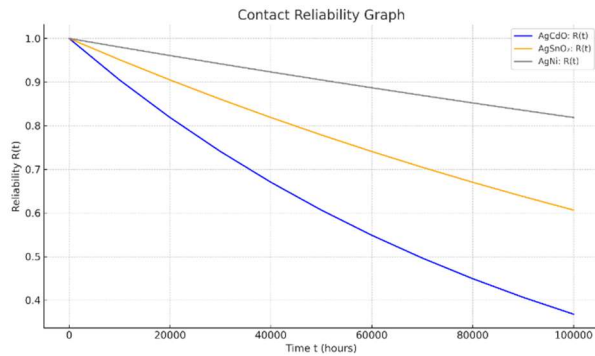


Fig. 2. Reliability of Contacts Made from Different Materials

The graph shows that:

- AgNi exhibits the highest reliability throughout the entire operational period due to its lowest failure rate λ ;
- AgSnO₂ demonstrates better reliability than AgCdO, but is still outperformed by AgNi;
- AgCdO shows the lowest reliability because of its higher failure rate.

These results confirm the rationale for using AgNi and AgSnO₂ to improve the reliability of contact joints.

Practical Implementation and Prospects. Based on the conducted analysis, the following is proposed:

- Implementation of AgSnO₂ and AgNi as the primary contact materials in locomotive power devices to improve reliability and environmental safety;
- Application of nanostructured composites to enhance wear resistance and electrical performance of contacts;
- Utilization of modern nanostructuring technologies, such as PVD and mechanical alloying, to obtain materials with improved properties;
- Adaptation of international standards to ensure compatibility and competitiveness of the equipment in the global market.

Conclusions. The conducted study confirms that the improvement of electrical contact joints in locomotive power devices is both a technically and economically feasible approach to increasing overall system reliability. By integrating modern composite and nanostructured materials, it is possible to significantly extend the operational life of contact elements and reduce maintenance frequency, particularly under high mechanical and thermal loads typical for railway applications.

An analytical approach was effectively applied to model and compare the performance of different contact materials. This method allowed the

evaluation of key parameters, such as contact resistance and long-term reliability, without the need for extensive experimental infrastructure. The calculated results show clear advantages of AgNi and AgSnO₂ over traditional materials like AgCdO, both in terms of lower electrical resistance and higher durability over time.

Moreover, the environmental safety of materials plays a crucial role in modern engineering. The use of cadmium-free alternatives, such as AgSnO₂ and AgNi, aligns with the latest international standards (e.g., IEC 60947, RoHS Directive) and supports global sustainability efforts. Their implementation reduces ecological risks and improves compatibility with future green certifications.

From a technological standpoint, multilayer nanocomposites and advanced deposition methods (e.g., PVD, mechanical alloying) provide engineers with powerful tools for tailoring contact surface properties to specific operating environments. These innovations enable the creation of high-performance contacts with optimized mechanical strength, thermal resistance, and conductivity.

In summary, the transition to innovative materials and manufacturing methods for contact joints:

- Increases reliability and service life of locomotive electrical systems;
 - Reduces operational costs by minimizing failures and replacements;
 - Ensures compliance with environmental and technical regulations;
- Enhances the overall efficiency and competitiveness of railway transport technologies.

The proposed materials and design strategies represent a strategic step forward in the modernization of railway equipment and open new avenues for future research and industrial adoption.

References

1. Kumar S., Singh, P. Reliability engineering in railway transportation systems. Springer, 2018.
2. Holm R. Electric contacts: Theory and application. Springer, 2010. 484 p.
3. Mizutani T. Electrical contact phenomena in high-current switching devices. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2019. 42(3). P. 567-574. <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2019.1234567> (date of access: 01.10.2025).
4. Electrical contacts: Principles and applications / editor Paul G. Slade. 2nd Edition. CRC Press, 2014.
5. Thermal analysis of electrical contacts under high current loads / Schenk T. et al. IEEE Transactions

- on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2020. 10(5). P. 893–901. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2020.1234567> (date of access: 01.10.2025).
6. IEC 60947-1: 2020. Low-voltage switchgear and controlgear – Part 1: General rules. International Electrotechnical Commission, 2021.
 7. IEEE C37.016: Standard for AC high voltage circuit switchers rated 15.5 kV through 245 kV. IEEE, 2018.
 8. Wang Z., Zhang H. Environmental regulations and replacement of AgCdO electrical contact materials. Journal of Materials Science. 2017. 52(14), P. 8498–8512. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1234-5> (date of access: 01.10.2025).
 9. Performance of AgSnO₂ electrical contact materials / Zheng L. et al. Materials Research Bulletin. 2019. Vol. 112. P. 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2019.05.012> (date of access: 01.10.2025).
 10. Kim J. S., Lee K. H. Electrical and mechanical properties of AgNi electrical contacts. Applied Surface Science. 2020. Vol. 507. 145111. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145111> (date of access: 01.10.2025).
 11. Nanocomposite materials for electrical contacts / Cheng X. et al. Advanced Materials. 2018. Vol. 30(25). 1706807. <https://doi.org/10.1002/adma.201706807> (date of access: 01.10.2025).
 12. Liu Y., Yan X. Enhanced electrical conductivity of copper composites with graphene additives. Materials Letters. 2019. Vol. 236. P. 221–224. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.10.123> (date of access: 01.10.2025).
 13. Directive 2011/65/EU: Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. Official Journal of the European Union. 1.7.2011. P. 88–110.
 14. Gradient multilayer electrical contacts for improved performance / Huang S. et al. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2019. 9(2). P. 287–294. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2019.1234567> (date of access: 01.10.2025).
 15. Mattox D. M. Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing. Elsevier, 2014.
 16. Antony G. Contact resistance modelling in electrical connectors. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2017. 40(4). P. 813–820. <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2017.1234567> (date of access: 01.10.2025).
 17. Ebeling C. E. An introduction to reliability and maintainability engineering. Waveland Press, 2019. 658 p.

Співак О.М, Іванченко С.С., Мелконова І.В, Мелконов Г.Л. Підвищення надійності силових пристроїв електровозів шляхом удосконалення контактних з'єднань

У сучасному залізничному транспорті надійність електричних силових пристроїв є ключовим фактором забезпечення безпеки та ефективності експлуатації локомотивів. Безперебійна робота таких систем, як тягові двигуни, перетворювачі та захисні реле, безпосередньо впливає на стабільність руху поїздів та безпеку пасажирів.

Серед критично важливих компонентів цих систем є електричні контактні з'єднання, які зазвичай використовуються в комутаційних пристроях, таких як контактори та автоматичні вимикачі. Ці з'єднання регулярно піддаються значним електричним та механічним напруженням, включаючи комутацію високого струму, термоцикування та вібрацію, що сприяє зносу контактів та їх подальшому виходу з ладу.

Деградація контактних поверхонь призводить до збільшення контактного опору, зниження провідності та підвищеної ймовірності утворення дуги, що зрештою ставить під загрозу загальну функціональність енергосистеми. Тому підвищення довговічності та електричних характеристик контактних з'єднань є важливим завданням у розробці більш надійних енергосистем локомотивів.

Це дослідження зосереджено на визначенні ефективних стратегій підвищення надійності контактних з'єднань шляхом аналізу контактних матеріалів, моделювання ключових експлуатаційних параметрів, таких як контактний опір та ймовірність виходу з ладу, та оцінки сучасних технологій матеріалів. Особлива увага приділяється використанню композитних та наноструктурованих матеріалів, які забезпечують підвищену механічну міцність, стійкість до ерозії та відповідають міжнародним екологічним стандартам.

Надійність електричного обладнання на залізничному транспорті є критично важливою для забезпечення його працездатності та безпеки експлуатації. Контактні елементи, що використовуються для комутації електричних ланцюгів, мають суттєвий вплив на загальну ефективність та надійність роботи цих приладів. У даній статті представлено дослідження, спрямоване на підвищення експлуатаційної надійності та середнього часу відмов локомотивних тягових електромагнітних контакторів шляхом покращення стабільності їхніх контактних характеристик. У зв'язку з високою вартістю та складністю проведення широкомасштабних експериментальних досліджень основна увага зосереджена на аналітичних методах та вивченні властивостей використовуваних матеріалів. Запропоновано можливі шляхи удосконалення на

основі доступних технологій і матеріалів відповідно до міжнародних стандартів та сучасних інновацій.

Ключові слова: надійність, електричні силові прилади, локомотиви, контактні з'єднання, електромагнітні контактори, контактний опір, міжнародні стандарти, інноваційні матеріали, композиційні матеріали, наноструктуровані матеріали.

Співак Олександр Миколайович – к.т.н., доц., доцент, кафедра електромеханіки та рухомого складу залізниць, Національний транспортний університет, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту (м.Київ), alexspi@ukr.net

Іванченко Сергій Сергійович – аспірант, кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць,

Національний транспортний університет, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту (м. Київ),

Мелконова Інна Вікторівна – к.т.н., доц., завідувачка кафедрою електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), melkonova@snu.edu.ua

Мелконов Григорій Леонідович – к.т.н., доц., завідувач кафедрою механізації сільського господарства, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), g.melkonov78@snu.edu.ua

Стаття подана 21.08.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-39-44>

УДК 004.92[621:744]

НАРИСНА ГЕОМЕТРІЯ ЯК ОСНОВА ІНЖЕНЕРНОЇ ГРАФІЧНОЇ ОСВІТИ

Карпюк Л.В., Давіденко Н.О., Якимець О.М., Титаренко О.В.

DESCRIPTIVE GEOMETRY AS THE BASIS OF ENGINEERING GRAPHIC EDUCATION

Karpiuk L.V., Davidenko N.O., Yakymets O.M., Titarenko O.V.

В даній статті розглянута важливість вивчення нарисної геометрії у світлі інформатизації інженерної графічної освіти. Графічна освіта – це процес, унаслідок якого людина набуває вміння сприймати, створювати, зберігати та передавати різну графічну інформацію про предмети, процеси та явища. У статті також проаналізовано послідовність формування навичок роботи з графічними моделями об'єктів у процесі підготовки до інженерної діяльності на етапі школа – виш. У загальноосвітній школі відповідальними за формування навичок роботи з графічними моделями об'єктів можна вважати такі навчальні дисципліни, як малювання, геометрія, креслення. Вивчення кожної дисципліни переслідує певні цілі. Малювання більшою мірою спрямоване на набуття навичок реалістичного зображення об'єктів. Планіметрія і стереометрія, як розділи геометрії, призначені відповідно для формування вміння працювати із зображеннями плоских геометричних і найпростіших просторових об'єктів за їхніми довільними паралельними та центральними проєкціями. Метою вивчення креслення є набуття навичок читання та оформлення креслення – плоскої ортогональної проєкційної моделі просторового об'єкта на взаємно перпендикулярні площини. Подальшу графічну освіту здобувають у професійному навчальному закладі. У технічному виші за інженерно-графічну освіту, так само як і в школі, відповідають багато навчальних дисциплін, але її основи формуються під час вивчення нарисної геометрії (НГ) та інженерної графіки (ІГ). Традиційно вивчення цих дисциплін спрямоване на формування навичок сприйняття та створення конструкторського документа – креслення, як одного з видів інженерно-графічної інформації. Інженерна графічна освіта спрямована на формування навичок роботи з найскладнішим, з погляду сприйняття людиною, зображенням об'єкта

– проєкційним кресленням, що містить численні умовності та спрощення. Технічні труднощі створення такого зображення сприяли розвитку засобів автоматизації проєктно-конструкторських робіт, і вершиною цього процесу стала поява сучасних графічних пакетів. Еволюція інструментальних можливостей систем автоматизованого проєктування відбувалася в напрямку, зворотному до етапів графічної освіти: від використання комп'ютера як інструменту побудови двовимірного креслення виробу через тривимірну геометричну модель до інформаційної віртуальної моделі.

Ключові слова: графічна освіта, модель, моделювання, автоматизація, креслення, графічний пакет, AutoCAD.

Вступ. Розвиток апаратних та програмних засобів роботи з графічною інформацією призвело до того, що основним інструментом створення, зберігання та обробки зображення став комп'ютер. Якщо проаналізувати види графічної інформації, які використовуються в інженерній діяльності для реалізації інформаційної підтримки життєвого циклу виробу від задуму до утилізації, то на кожному етапі актуальними будуть різні види електронних документів. Серед них можна виділити такі, як традиційна проєктна документація, інформаційна віртуальна модель виробу та презентаційна інформація. У зв'язку з цим графічна освіта в технічному університеті повинна бути спрямована на формування фахівця, який володіє сучасними засобами подання інформації.

Основні аргументи на захист використання олівцево-паперової технології в інженерній графічній освіті, такі як низька комп'ютерна грамотність студентів та технічна оснащеність, втратили актуальність. Комп'ютерна грамотність абітурієнтів з кожним роком стає дедалі вищою. Слід зазначити той факт, що вже сьогодні до вузів вступають абітурієнти, які мають навички роботи з графічними пакетами.

Нарисна геометрія – це загально-професійна дисципліна, з якої починається інженерна графічна освіта у вищому навчальному закладі. Для її успішного вивчення студент повинен мати навички виконання найпростіших геометричних побудов та певний рівень розвитку просторової уяви. При цьому можна відзначити, що значну частку проблем, що виникають при вирішенні задач нарисної геометрії, становить саме відсутність навичок роботи з традиційними креслярськими інструментами і графічними пакетами. Навички роботи з креслярськими інструментами повинні бути придбані до вступу до вищого навчального закладу, а основи комп'ютерної графіки та автоматизованого проєктування, як дисциплін вузу, призначених для навчання комп'ютерним засобам створення та обробки зображень, вивчаються на старших курсах [1,4].

Незважаючи на те, що в програмі навчальної дисципліни «Інженерна графіка» передбачено дуже мало часу на навчання студента користування креслярським інструментом, об'єктивна реальність вимагає розвивати навички виконання найпростіших графічних побудов у процесі вивчення геометрії, що не є метою вивчення предмета. Сьогодні легше і швидше навчити студента виконувати графічні побудови за допомогою комп'ютерних програм, ніж якісному виконанню кресленика традиційними інструментами креслення. При цьому мотивація до вивчення важкого для сприйняття студентами предмета зростає, тому що в процесі вивчення набуваються навички використання сучасних інформаційних технологій в інженерній діяльності.

Викладення основного матеріалу.

Нарисна геометрія – розділ геометрії, в якому просторові фігури, а також методи вирішення та дослідження просторових завдань вивчаються за допомогою їх зображень на площині. Для

виконання графічних побудов на площині можна застосовувати графічний редактор AutoCAD, що є системою для автоматизації креслярських робіт у їхньому традиційному розумінні [2,5]. Папір замінює двовимірний робочий простір, а замість креслярських інструментів використовується набір команд, призначених для виконання графічних побудов. Застосування олівцево-паперової технології для геометричних побудов в умовах, коли такий креслярський прилад, як кульман, у вузах можна зустріти тільки як музейний експонат, а для проведення паралельних і перпендикулярних ліній застосовується в кращому разі рейсшина, а найчастіше набір трикутників, що призводить до різкого падіння точності графічних побудов. У результаті розуміння та дотримання студентами алгоритмів розв'язування позиційних і метричних задач нарисної геометрії перестає бути визначальним чинником правильності виконання завдання, а навпаки, може стати причиною невпевненості в розумінні предмета. Виправлення помилок, допущених у процесі виконання роботи, призводить до помарок і багаторазового перекреслювання, що значно підвищує трудомісткість навчального процесу і знижує кількість розв'язуваних навчальних завдань. Застосування для оформлення задач нарисної геометрії креслярських інструментів графічного пакета знімає описані вище проблеми і дає змогу, об'єднавши точність алгебраїчних обчислень і наочність геометричних побудов, зробити розуміння предметного змісту відповідальним за правильність розв'язання. Навички роботи з графічним пакетом студенти набувають досить швидко, а час, витрачений на ознайомлення з програмою, повністю компенсується тим, що доопрацювання і виправлення графічних робіт, виконаних в електронному вигляді, не вимагають повного переоформлення кресленика.

Основною умовою застосування графічного пакета в процесі навчання графічним дисциплінам є його доступність для індивідуального використання студентом у позааудиторній самостійній роботі. Вона забезпечується наявністю навчальної версії, яку без порушення авторських прав можна встановити на будь-якому комп'ютері. Нині всі компанії, що розробляють графічні пакети, мають різні освітні програми, що дають змогу

навчальним закладам купувати відносно недорогі університетські ліцензії, а студентам використовувати для самостійної роботи їхні продукти. Крім того, значення має відповідність інструментальних можливостей графічного пакета вимогам предметної підготовки. У цьому сенсі для вивчення нарисної геометрії підходить будь-який представлений на ринку графічний пакет. У таких системах, як SolidWorks і AutoCAD, плоске креслення і твердотільна деталь – різні графічні документи, які можуть бути пов'язані асоціативно. Тому інформаційне середовище цих систем дуже зручне для реалізації навчання нарисній геометрії.

Протягом останніх років ми пропонували студентам як креслярський інструмент для оформлення епюр нарисної геометрії використовувати AutoCAD. В умовах, коли аудиторний час навчання предмету зменшується, не видається можливим відводити його на вивчення графічного пакета достатньо, тому неодмінною вимогою було також і самостійне вивчення AutoCAD. Знайомство з інтерфейсом програми під час першого аудиторного заняття та виконання всіх геометричних побудов викладачем з використанням AutoCAD на заняттях для пояснення теоретичного матеріалу та розв'язання задач, як показала практика, є достатньою умовою для успішного освоєння пакета більшістю студентів. Авторські навчальні посібники та вбудована в пакет «Довідка» використовували як для аудиторного, так і для самостійного знайомства з інструментальними можливостями пакета, а розв'язання питань, що виникали, здійснювали під час консультацій, як аудиторних, так і з використанням електронної пошти.

Слід зазначити, що під час застосування будь-якого графічного пакета для розв'язання задач нарисної геометрії виникають деякі незручності, пов'язані з невідповідністю систем координат (рис. 1). Робочий простір графічного пакета – це площина, положення будь-якої точки в якій задається координатами x і y . За замовчуванням координатні осі мають напрямки, прийняті в математиці. Формування комплексного кресленника в нарисній геометрії відбувається поєднанням двох взаємно перпендикулярних площин проєкцій, обертанням горизонтальної площини проєкцій навколо осі x до поєднання з фронтальною

площиною. На отриманій таким чином площині ми використовуємо для побудови проєкцій об'єкта три координати (x, y, z) .

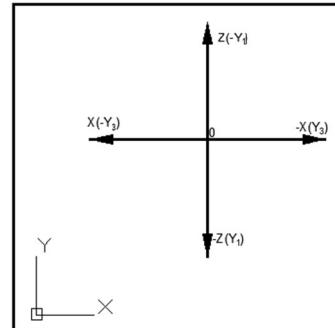


Рис. 1. Системи координат AutoCAD і нарисної геометрії

Крім того, напрямки осей координат нарисної геометрії та світової системи, встановленої за замовчуванням у будь-якому графічному пакеті, різняться. Якщо напрямки осей x і y можна привести у відповідність введенням користувацької системи координат, то застосування координати z вимагає додаткових умовностей. Введення координати z на панелі властивостей у діалогове вікно значення координати y зі знаком «мінус», як показала практика, значно ускладнює розуміння студентами процесу формування проєкційних зображень об'єктів. Цього можна уникнути, якщо побудови в графічному пакеті виконувати так само, як це відбувається на папері: для побудови проєкцій точки з координатами (x, y, z) від осі ординат з точки з координатами $(x, 0)$ відновлюють перпендикулярні відрізки – лінії проєкційного зв'язку, на яких не за допомогою лінійки, а введенням довжини в діалоговому вікні панелі властивостей відкладають відстані вгору, що дорівнюють координаті z , а вниз – y .

Організація навчання нарисній геометрії в середовищі AutoCAD дає змогу одночасно з вивченням предметного змісту знайомити студентів з інструментальними можливостями системи. Так, під час вивчення способів графічного завдання точки, лінії, площини набуваються навички створення користувацької системи координат і методів побудови найпростіших геометричних об'єктів у комп'ютерному середовищі, а в процесі розв'язування позиційних і метричних задач – навички роботи з прив'язками та інструментами редагування зображення, проведення

паралельних і перпендикулярних ліній. На рис. 2 наведено приклад виконання індивідуального графічного завдання «Пряма і площина», оформленого за допомогою AutoCAD. Під час розв'язування задачі було вивчено алгоритми нарисної геометрії, призначені для розв'язування позиційної задачі (знаходження точки перетину прямої та площини) і метричних задач (визначення розмірів відрізка та трикутника) [6].

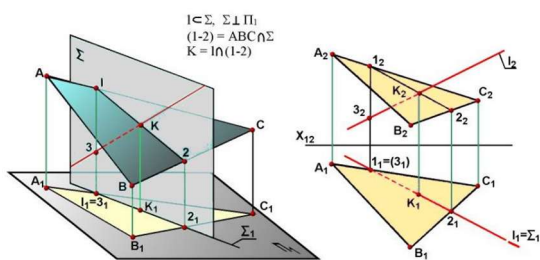


Рис. 2. Приклад розв'язання індивідуального графічного завдання «Пряма і площина»

Навички двовимірних геометричних побудов в AutoCAD, сформовані в процесі оформлення епор (креслеників), дають змогу перейти до тривимірного моделювання в системі AutoCAD-3D. Використання інструментів моделювання AutoCAD-3D для демонстрації алгоритмів формоутворення поверхонь, що вивчаються в нарисній геометрії, сприяє кращому сприйняттю навчальної інформації та набуттю навичок створення електронних моделей об'єктів.

Ці моделі (рис. 3) сприяють усвідомленій побудові проєкційного креслення, а порівняння епори, отриманої в AutoCAD, з асоціативним креслеником дає змогу студенту самостійно перевірити правильність виконання роботи (рис. 4).

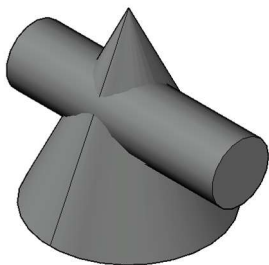


Рис. 3. Модель циліндра і конуса

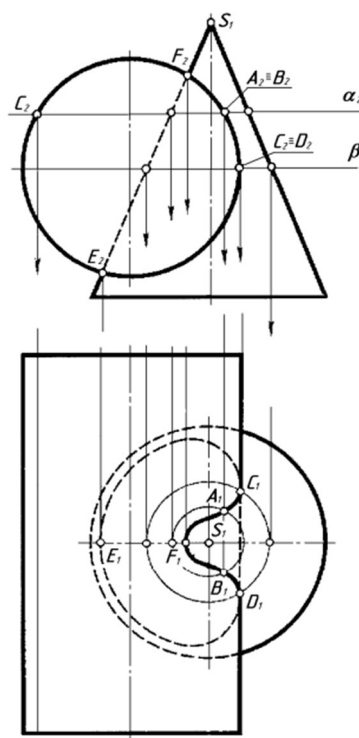


Рис. 4. Приклад виконання індивідуального графічного завдання «Перетин циліндра і конуса»

Висновки. До кінця семестру студенти, які вивчають нарисну геометрію з використанням AutoCAD, набувають навичок геометричного моделювання – як плоского, так і тривимірного, що, своєю чергою, створює платформу для організації вивчення інженерної графіки в середовищі AutoCAD-3D, яке дає змогу розпочинати підготовку конструкторської документації з побудови моделі виробу з подальшим оформленням асоціативних графічних конструкторських документів відповідно до вимог ЄСКД.

Практика використання AutoCAD-3D у процесі навчання нарисній геометрії засвідчила, що застосування графічних пакетів у рамках початкової графічної підготовки в університеті є доцільним і не завдає шкоди змістовній частині предмета. При цьому слід зазначити, що використання креслярських графічних пакетів для розв'язування навчальних завдань на початковому етапі вищої професійної освіти сприяє формуванню стійких навичок застосування сучасних інформаційних технологій для розв'язування виробничих завдань і в такий спосіб створює умови для підготовки сучасного IT-спеціаліста для різних галузей промисловості.

Література

1. Ткаченко В. Л., Тищенко Ю. А., Суховерхов В. К. Нарисна геометрія: навч. посібн. Луганськ: Вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2004. 192 с.
2. Петренко О. Я. Проектування тривимірних об'єктів засобами AutoCAD. 2008: Навчальний посібник. К: ПДО НУХТ, 2010. 64 с.
3. Дзеджула О. М., Островський А. Й. Нарисна геометрія. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2019. 296 с.
4. Буда А. Г. Нарисна геометрія. Збірник прикладів та задач з теоретичними відомостями для студентів машинобудівних спеціальностей. Вінниця: ВНТУ, 2005. 142 с.
5. Карпюк Л. В., Гуліда М. І., Ревенко С. А. Комп'ютерна графіка в машинобудівних кресленнях: навч. Посібник. Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. 132 с.
6. Макаренко М. Г., Юрчук В. П. Використання AutoCAD в інженерній графіці. Практикум. К. : НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського, 2018. 76 с.

References

1. Tkachenko V. L., Tyshchenko Yu. A., Sukhoverkhov V. K. Narysna heometriia: navch. posibn. Luhansk: Vyd-vo Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia, 2004. 192 s.
2. Petrenko O. Ya. Proektuvannia tryvymirnykh obiektiv zasobamy AutoCAD. 2008: Navchalnyi posibnyk. K: IPDO NUKhT, 2010. 64 s.
3. Dzhedzhula O. M., Ostrovskiy A. Y. Narysna heometriia. Navchalnyi posibnyk. Vinnytsia: VNAU, 2019. 296 s.
4. Buda A. H. Narysna heometriia. Zbirnyk prykladiv ta zadach z teoretychnymy vidomostiamy dlia studentiv mashynobudivnykh spetsialnostei. Vinnytsia: VNTU, 2005. 142 s.
5. Karpjuk L. V., Hulida M. I., Revenko S. A. Kompiuterna hrafika v mashynobudivnykh kreslenniakh: navch. posibnyk. Luhansk : Vyd-vo SNU im. V. Dalia, 2007. 132 s.
6. Makarenko M. H., Yurchuk V. P. Vykory-stannia AutoCAD v inzhenernii hrafitsi. Praktykum. K. : NTUU «KPI» im. I. Sikorskoho, 2018. 76 s.

Karpiuk L. V., Davidenko N. O., Yakymets O. M. Descriptive geometry as the basis of engineering graphic education

This article discusses the importance of studying descriptive geometry in light of the computerization of engineering graphic education. Graphic education is a process through which a person acquires the ability to perceive, create, store, and transmit various graphic information about objects, processes, and phenomena. The article also analyzes the sequence of developing skills in working with graphic models of objects in the process of preparing for engineering activities at the school-university stage. In general education schools, subjects such as drawing, geometry, and drafting can be considered responsible for developing skills in working with graphic models of objects. The study of each discipline pursues specific goals. Drawing is largely aimed at acquiring the skills of realistic representation of objects. Planimetry and stereometry, as branches of geometry, are designed to develop the ability to work with images of flat geometric and simple spatial objects using their arbitrary parallel and central projections. The purpose of studying drawing is to acquire the skills of reading and drawing a drawing – a flat orthogonal projection model of a spatial object onto mutually perpendicular planes. Further graphic education is obtained at a professional educational institution. In technical universities, engineering and graphic education, just like in school, covers many academic disciplines, but its foundations are formed during the study of descriptive geometry (DG) and engineering graphics (EG). Traditionally, the study of these disciplines is aimed at developing skills in perceiving and creating design documents – drawings as a type of engineering and graphic information. Engineering graphic education is aimed at developing skills for working with the most complex, from the point of view of human perception, image of an object – a projection drawing containing numerous conventions and simplifications. The technical difficulties involved in creating such images contributed to the development of automation tools for design and engineering work, culminating in the emergence of modern graphics packages. The evolution of the instrumental capabilities of computer-aided design systems has proceeded in the opposite direction to the stages of graphic education: from the use of a computer as a tool for constructing a two-dimensional drawing of a product, through a three-dimensional geometric model, to an informational virtual model.

Keywords: *graphic education, model, modeling, automation, drafting, graphics package, AutoCAD.*

Карпюк Людмила Вікторівна, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, karp224@gmail.com

Давіденко Наталія Олександрівна, старший викладач кафедри іноземної філології та перекладу, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, nat.davidenko11@gmail.com

Якимець Олександр Максимович, здобувач вищої освіти факультету інформаційних технологій та електроніки, кафедра комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, atp-22d-137@snu.edu.ua

Тігаренко Олександр Вікторович, здобувач вищої освіти факультету інформаційних технологій та електроніки, кафедра комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, asp-174-24-768@snu.edu.ua

Статтю подано 13.09.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-45-51>

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМУ ВЗАЄМОДІЇ БУРОВОГО ДОЛОТА З ГІРСЬКОЮ ПОРОДОЮ

Моркун В.С., Моркун Н.В., Бобров Є.Ю., Грищенко Я.О.

MODELING THE MECHANISM OF INTERACTION BETWEEN A DRILL BIT AND ROCK

Morkun V.S., Morkun N.V., Bobrov E.Y., Hryshchenko Y.O.

У дослідженні виконано моделювання основних складових взаємодії бурового долота з гірською породою при бурінні свердловин в процесі розробки рудних покладів для формування інформаційної бази автоматизованого керування буровою установкою. При обертальному способі буріння має місце реалізація п'яти механізмів взаємодії робочого органу установки з гірською породою: втискання інструменту; зріз шару породи; ударне сколювання породи; тертя інструменту об стінки свердловини; видалення бурового щламу із вибою. Наведені механізми взаємодії робочого органу бурової установки з гірською породою призводять до складної динаміки рухів її основних функціональних блоків, що включає обертальні та поступальні складові. Її динамічна модель може бути представлена у вигляді сукупності з'єднаних елементарних базових коливальних блоків, що складаються з пружини (засобу для зберігання потенційної енергії), маси або інерції (засобу для зберігання кінетичної енергії) та демпфера (засобу, за допомогою якого енергія поступово губиться). Математичну модель бурової установки можна представити рівнянням руху приводної системи в надземній частині, рівнянням руху бурового інструменту в свердловинній частині та рівнянням взаємодії долота з гірською породою. Механізм руйнування гірської породи в процесі буріння свердловин носить яскраво виражений динамічний характер енергоємної контактної взаємодії, впродовж якої кожен елемент долота є джерелом високоамплітудних віброакустичних коливань, які в сукупності характеризують цей процес. Запропоновано моделі як обертальної, так і поступальної складових взаємодії. Супутнім ефектом обертальної складової є «прихват-прослизання» бурового інструменту, яке відбувається, коли механізм зачеплення бурового

долота з пластом має нелінійний характер. Це змушує всю бурову колону ковзати або зупинятися. Однак, якщо накопичена крутильна енергія досягне певного рівня, долото раптово відпускається і починає обертатися з високою швидкістю. Результируюча торсіонна біжуча хвиля передається у верхню частину системи обертання. Також змодельовано аксіальний рух основних структурних складових бурової установки в залежності від динаміки бурового інструменту.

Ключові слова: керування, автоматизація, буріння, свердловина, вібрація, моделювання, характеристики.

Вступ. Для побудови ефективної моделі процесу буріння свердловин необхідно виконати аналітичний опис динаміки складових частин бурової установки, а також моделювання функцій, що важко формалізуються та аналітично не визначаються за допомогою яких задаються характеристики взаємозв'язків «бурове долото - гірська порода».

Долото - основний інструмент, який використовується при бурінні; воно виконує руйнівальну дію щодо гірської породи при проходці свердловин. Вибір найкращого долота та умов його експлуатації є однією з проблем, з якою стикаються інженери під час буріння. Існує широкий вибір бурових долот, які використовуються відповідно до умов буріння. Проте для обертального буріння їх в основному поділяють на дві категорії: шарошечні долота та долота з фіксованими різцями [1-3].

Долота з фіксованими фрезами містять леза, вбудовані в корпус долота. Долото та леза

обертаються як єдине ціле. Це є перевагою, оскільки немає необхідності турбуватися про вихід з ладу частин, що рухаються. Крім того, через зсув дії різців, ці долота потребують меншого навантаження на робочі поверхні і можуть використовуватися для більш широкого діапазону пластів. Долота з полікристалічним алмазом PDC (Polycrystalline Diamond Compact) є поширеним типом долот з фіксованою фрезою.

Шарошечні долота мають одну або кілька шарошок з ріжучими елементами, які обертаються вздовж осі конуса при русі долота проти пласта. Зуби шарошки періодично стикаються з породою і під впливом осьового зусилля F подачі кожен із них заглиблюється на певну глибину.

Внаслідок косоного удару у породі утворюється несиметрична лунка, витягнута у напрямі удару. У наступний момент, завершуючи сколювання породи прослизанням, зуб вдавлюється в лунку, що утворилася, завершуючи процес руйнування в даній точці вже під дією статичного вдавлювання.

Експериментальні дослідження та теоретичні моделі довели, що об'єм лунки для зуба у формі долота визначається як [4]

$$V_c = \left(\frac{F}{SL}\right)^2 \quad (1)$$

де V_c - об'єм лунки на одиницю ширини різця; F - сила прикладена до одного зуба; S - міцність гірської породи; L - довжина гребеня зуба.

Якщо кожен удар зуба вважається однаково ефективним, то швидкість проходки ROP можна визначити як [4]

$$ROP = \frac{4wL_tV_c}{\pi d_b^2} \quad (2)$$

де w - швидкість обертання долота; L_t - загальна довжина гребеня зуба долота; d_b - діаметр долота.

Рівняння (2) не є реалістичним виразом для ROP, оскільки воно означає, що верхньої межі ROP немає зі збільшенням навантаження на долото. Обмеження на ROP накладаються як через механічну конструкцію, так і через міркування щодо видалення шламу. Оскільки зубці прикипають глибше в пласт, навантаження розподіляється на більшу кількість зубців. Якщо припустити, що частка ваги, яка підтримується сусідніми зубцями, пропорційна загальній глибині проникнення зубців і нерозривно пропорційна їх довжині, то ROP визначається за формулою [4]

$$ROP = \left(\frac{ad_b^3S^2}{wW^2} + \frac{2c}{wd_b} - \frac{c^2 \cdot ROP}{w^2d_b^2}\right)^{-1} \quad (3)$$

де a, c - безрозмірні константи.

Загалом можна відзначити універсальність породоруйнівної дії шарошечних доліт, а саме поєднання динамічних та статичних впливів на породу та реалізацію породоруйнівних зусиль як у напрямку перпендикулярно до забою (роздавлювання), так і в площині вибою (сколювання). Можна додати, що при прослизанні шарошок на вибої відбувається ще й різання-сколювання породи. В результаті цього процесу формуються коливання різної амплітуди і частоти як у самому долоті, так і у гірському масиві.

При бурінні долотом PDC процес взаємодії породи з долотом включає різання/зсув породи, що викликає тертя між різцями та породою. При цьому кожен окремий різець відчуває різну величину та напрямок сили, залежно від його розташування на профілі долота [5].

Феноменологічна модель, запропонована у роботі [6], враховує, що ріжуча дія фрикційного долота складається як з процесу різання, так і з процесу тертя. Вважається, що компоненти крутного моменту ТОВ та навантаження на долото WOB діють на кожен різець долота. При бурінні гірських порід середня ріжуча сила T_c і середня вага, що переноситься ріжучою поверхнею, W_c є ріжучими компонентами ТОВ і WOB відповідно, а сила тертя T_f і поверхня контакту W_f є відповідними компонентами тертя. У моделі взаємодії породи з долотом як вхідні дані використовуються WOB і кутова швидкість долота w_b , а момент, що крутить, на долоті T_b ; крутний момент, пов'язаний з тертям T_f ; вага, пов'язана з тертям W_f ; крутний момент, пов'язаний з різанням T_c ; вага, пов'язана з різанням W_c , є виходами.

Рівняння для крутного моменту на долоті T_b (відображає момент нелінійного тертя, обумовлений взаємодією породи і долота), що зазнає переривчастого прослизання [5]

$$T_b = D_b W_b [\mu_{cb}(w_b) + (\mu_{sb} - \mu_{cb})e^{-\lambda|w_b|}] \quad (4)$$

де μ_{cb} та μ_{sb} - статичні коефіцієнти сухого та кулонівського тертя, λ - коефіцієнт загасання, рівний 0,9, w_b - кутова швидкість долота.

Це явище, відоме як «прихват-прослизання», відбувається, коли механізм зчеплення бурового долота з пластом має нелінійний характер [7]. Це змушує всю бурову

колону ковзати або зупинитися. Однак, якщо накопичена крутильна енергія досягне певного рівня, долото раптово відпускається і починає обертатися з високою швидкістю. Результуюча торсіонна біжуча хвиля передається у верхню частину системи обертання. Однак, оскільки силова головка має сильну інерцію, вона може утримувати бурову колону, так що торсіонна хвиля повертається до долота. Таким чином, долото знову зупиняється і хвиля крутного моменту повторюється, що спричиняє дуже велику та шкідливу вібрацію бурової колони. Якщо втратити контроль за цим процесом, бурова колона та долото будуть пошкоджені разом [8].

Метою роботи є моделювання механізму взаємодії бурового долота з гірською породою при бурінні свердловин в процесі розробки рудних покладів для формування інформаційної бази автоматизованого керування буровою установкою.

Викладання основного матеріалу. Для моделювання обертального руху долота в процесі його взаємодії з гірською породою використано блок тертя обертання Rotational Friction із бібліотеки Simscape® для Simulink® /MATLAB®[9]. Він відтворює функцію тертя при контакті між обертовими тілами. Крутний момент тертя моделюється як функція відносної швидкості та вважається сумою компонентів тертя Штрібека (Stribeck), Кулона та в'язкості, як показано на рис. 1 [10].

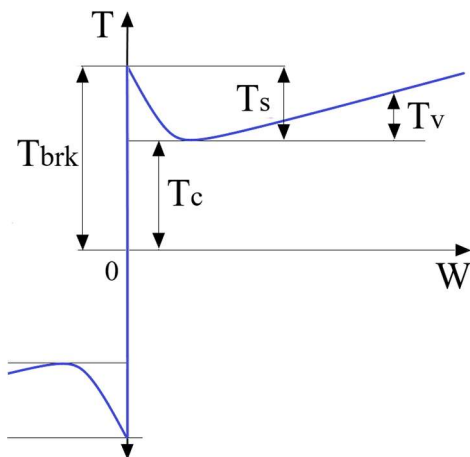


Рис. 1. Компоненти тертя обертання

Тертя Штрібека (Stribeck) T_S - це характеристики з від'ємним нахилом, що мають місце при низьких швидкостях [11]. Кулонівське тертя T_C призводить до постійного крутного моменту при будь-якій швидкості.

В'язке тертя T_V протидіє руху з крутним моментом, прямо пропорційним відносній швидкості. Сума кулонівського і стрібеківського тертя в околицях нульової швидкості визначає тертя відриву T_{brk} . Загалом тертя обертання апроксимується такими рівняннями [9,11]

$$T = \sqrt{2e} (T_{brk} - T_C) \exp\left(-\left(\frac{w}{w_{st}}\right)^2\right) \cdot \frac{w}{w_{st}} + T_C \cdot \tanh\left(\frac{w}{w_{coul}}\right) + fw \quad (5)$$

де $w_{st} = w_{brk}\sqrt{2}$; $w_{coul} = w_{brk}/10$; $w = w_R - w_C$; T - момент тертя; T_C - кулонівський момент тертя; T_{brk} - момент тертя відриву; w_{brk} - швидкість тертя відриву; w_{st} - поріг швидкості Штрібека; w_{coul} - поріг кулонівської швидкості; w_R та w_C - абсолютні кутові швидкості портів R і C блоку тертя обертання; ω - відносна швидкість; f - коефіцієнт в'язкого тертя.

Експоненціальна функція, яка використовується в частині рівняння сили Штрібека, є неперервною і спадає при величинах швидкості, більших за швидкість відривного тертя. Функція гіперболічного тангенса, яка використовується в кулонівській частині рівняння сили, гарантує, що рівняння є гладким і неперервним через $\omega = 0$, але швидко досягає свого повного значення при ненульових швидкостях.

На рис. 2 наведена модель механічної системи обертання бурового інструменту з ефектом прихват-прослизання у розширенні Simscape® для Simulink® /MATLAB® [9,12].

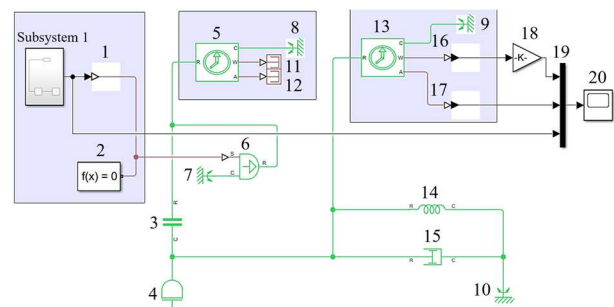


Рис. 2. Модель механічної системи обертання долота у свердловині з врахуванням ефекту прихват-прослизання

У моделі, що представлена на рис. 2, використані наступні елементи: 1 - блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 2 - блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 3 - блок Rotational

Friction із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 4 – блок Inertia із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 5 – блок Ideal Rotational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 6 – блок Ideal Angular Velocity Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 7, 8, 9, 10 – блок Mechanical Rotational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 11,12 – блоки PS Terminator із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Physical Signals / Sinks; 13 – блок Ideal Rotational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 14 - блок Rotational Spring із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 15 – блок Rotational Damper із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Rotational Elements; 16, 17 – блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 18 – блок Gain із бібліотеки Simulink / Math Operations; 19 – блок Mux із бібліотеки Simulink / Signal Routing; 20 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks.

Модель включає електричну підсистему формування сигналу джерела обертання (Subsystem 1), підсистему перетворення електричного сигналу у механічний рух на основі блока 6 Ideal Angular Velocity Source і підсистему врахування механічних властивостей контактної взаємодії бурового долота із середовищем із застосуванням блока 3 Rotational Friction, блока 4 Inertia, блока 14 Rotational Spring та блока 15 Rotational Damper. Інерційний блок з'єднаний з нерухомою точкою за допомогою пружини та демпфера. Інерція приводиться в дію джерелом швидкості за допомогою фрикційного елемента ковзання. Фрикційний елемент має різницю між тертям відриву та тертям Кулона, що призводить до стрибкоподібного руху за інерцією.

На рис. 3 наведено результати моделювання режиму прихват-прослизання долота у свердловині.

Як свідчать наведені на рис. 3 графіки, в результаті виникнення режиму прихват-прослизання долота у свердловині у частотній картині кутової швидкості долота з'являються нові складові, що означає відповідні зміни у спектрі цього процесу.

Для моделювання аксіальних рухів функціональних складових бурової установки, як реакції на взаємодію долота з гірською

породою, сформовано модель у розширенні Simscape® для Simulink® /MATLAB® [9], яка наведена на рис. 4.

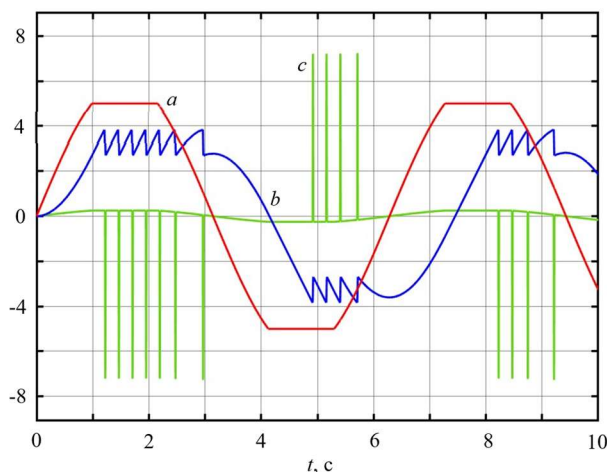


Рис. 3. Результати моделювання режиму прихват-прослизання долота у свердловині:
a – кутова швидкість джерела, rad/s (-5 0 5);
b – кутова позиція, rad (-4 0 4); *c* – кутова швидкість долота за результатами контактної взаємодії, rad/s (-150 0 150) = /0.05

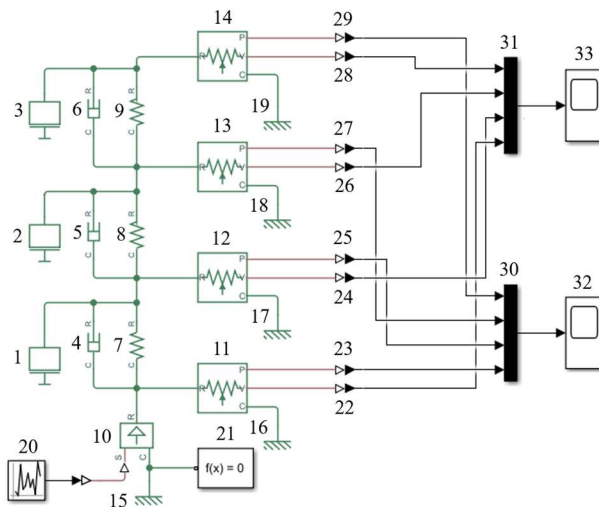


Рис. 4. Модель аксіальних рухів функціональних складових бурової установки через взаємодію долота з гірською породою

У наведеній на рис. 4 моделі використані наступні елементи: 1,2,3 - блок Mass із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 4,5,6 - Translational Damper із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 7,8,9 - блок Translational Spring із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 10 - блок Ideal Translational Velocity Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 11,12,13,14 - блок Ideal

Translational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 15,16,17,18,19 – блок Mechanical Translational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 20 - блок Uniform Random Number із бібліотеки Simulink / Sources; 21 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 22,23,24,25,26,27,28,29 – блок PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 30,31 - блок Mux із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Signal Routing; 32,33 - блок Scope із бібліотек Scope Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks;

Блок Translational Damper являє собою ідеальний механічний поступальний в'язкий демпфер. Блок Mass являє собою ідеальну механічну масу, що використовується при поступальному русі. Блок Translational Spring являє собою ідеальну механічну лінійну пружину.

Блок Ideal Translational Velocity Source являє собою ідеальне джерело швидкості, яке генерує диференціал швидкості на своїх терміналах, пропорційний вхідному фізичному сигналу. Джерело є ідеальним у тому сенсі, що воно вважається достатньо потужним, щоб підтримувати задану швидкість незалежно від сили, що діє на систему. Блок Ideal Translational Motion Sensor являє собою пристрій, який перетворює змінну, виміряну між двома механічними трансляційними вузлами, у керуючий сигнал, пропорційний прискоренню, швидкості або положенню. Датчик ідеальний, оскільки не враховує інерцію, тертя, затримки, споживання енергії тощо.

Блок Uniform Random Number генерує рівномірно розподілені випадкові числа протягом заданого інтервалу. Блок Mux поєднує вхідні дані з однаковим типом і складністю у віртуальний вектор. Блок Scope відображає сигнали у часовій області.

На рис. 5 наведено результати моделювання змін швидкості рухів основних структурних складових бурової установки в залежності від динаміки рухів бурового інструменту: *a* - приводний блок; *b* - свердловинна частина; *c* - блок бурового долота; *d* - вхідний сигнал.

Як свідчать наведені залежності, у частотній області механічні складові бурової установки постають природним фізичним фільтром високих частот сформованих

коливань. Таким чином, при використанні параметрів динаміки рухів долота в процесі його взаємодії з гірською породою в якості характеристичних ознак, сенсор має бути максимально наближений до джерела коливань чи використана процедура виділення відповідної складової з інтегрованого сигналу.

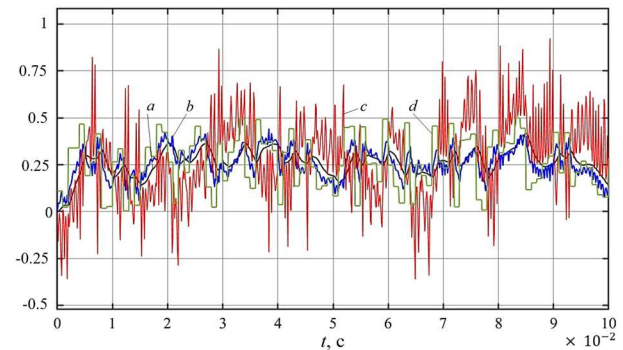


Рис. 5. Результати моделювання змін швидкості рухів основних функціональних складових бурової установки в залежності від динаміки рухів долота (нормалізовані значення): *a* - приводний блок; *b* - свердловинна частина; *c* - блок бурового долота; *d* - вхідний сигнал

Висновки. Важливим елементом процедури формування автоматизованого керування буровою установкою є моделювання динаміки руху функціональних складових бурової установки та визначення характеристичних ознак взаємодії бурового інструменту з гірською породою. Руйнування гірської породи в процесі буріння свердловин носить яскраво виражений динамічний характер енергоємної контактної взаємодії, впродовж якої кожен елемент долота є джерелом високоамплітудних віброакустичних коливань, які в сукупності характеризують цей процес. В силу значної невизначеності перебігу фізичних явищ, що відбуваються в цьому процесі з урахуванням пружних деформацій породи і зубів долота здійснити його адекватний аналітичний математичний опис практично неможливо. Отже для вирішення пов'язаних з цим проблем доцільно використати гібридний підхід, що знаходиться між стандартним фізичним моделюванням, якісними методами та нелінійною ідентифікацією за методом «чорної скриньки». Застосування такого підходу для формування ефективного автоматизованого керування процесом буріння свердловин є наступним етапом досліджень.

Література

1. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E. and Young F. S. Rotary Drilling Bits, in Applied Drilling Engineering, SPE Textbook Series no. 2 Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, 1986, ch. 5.
2. National Oilwell Varco. RockForce™ Bits in Products, 2014 [online]. Available: http://www.nov.com/Segments/Wellbore_Technologies/Downhole/Drill_Bits/Roller_Cone/RockForce_Bits/RockForce.aspx.
3. Liou J. The Hughes Christensen Talon PDC, 2016 [online]. Available: <http://www.drillingcontractor.org/new-bits-look-beyond-design-at-overall-wellbore16693>.
4. Warren T. M. Penetration-Rate Performance of Roller-Cone Bits. SPE Drill Eng 2, 1987, p. 9–18. doi: <https://doi.org/10.2118/13259-PA>.
5. Patil P. A., Teodoriu C. Analysis of Bit–Rock Interaction During Stick–Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. OIL GAS European Magazine 3/2013, p. 124–129. https://www.researchgate.net/publication/271192233_Analysis_of_Bit-Rock_Interaction_During_Stick-Slip_Vibration_Using_PDC_Cutting_Force_Model.
6. Detournay D., Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. International Journal of Rock Mechanics and Geomechanics.1992, vol. 29, no. 1, p. 13–23. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91041-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91041-3).
7. Kessai I., Benammar S., Doghmane M.Z., Tee K.F. Drill Bit Deformations in Rotary Drilling Systems under Large-Amplitude Stick-Slip Vibrations. Applied Science. 2020, 10, 6523. <https://doi.org/10.3390/app10186523>.
8. Zhou Z., Hu, Y., Liu B., Dai K., Zhang Y. Development of Automatic Electric Drive Drilling System for Core Drilling. Applied Science. 2023, 13, 1059. <https://doi.org/10.3390/app13021059>.
9. Simscape Block Libraries. <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
10. Rotational Friction. <https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/rotationalfriction.html>
11. Armstrong B. and C.C. de Wit. Friction Modeling and Compensation, The Control Handbook, CRC Press, 1995.
12. Mechanical Rotational System with Stick-Slip Motion. <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/mechanical-rotational-system-with-stick-slip-motion.html>

References

1. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E. and Young F. S. Rotary Drilling Bits, in Applied Drilling Engineering, SPE Textbook Series no. 2 Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, 1986, ch. 5.
2. National Oilwell Varco. RockForce™ Bits in Products, 2014 [online]. Available: http://www.nov.com/Segments/Wellbore_Technologies/Downhole/Drill_Bits/Roller_Cone/RockForce_Bits/RockForce.aspx.
3. Liou J. The Hughes Christensen Talon PDC, 2016 [online]. Available: <http://www.drillingcontractor.org/new-bits-look-beyond-design-at-overall-wellbore16693>.
4. Warren T. M. Penetration-Rate Performance of Roller-Cone Bits. SPE Drill Eng 2, 1987, p. 9–18. doi: <https://doi.org/10.2118/13259-PA>.
5. Patil P. A., Teodoriu C. Analysis of Bit–Rock Interaction During Stick–Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. OIL GAS European Magazine 3/2013, p. 124–129. https://www.researchgate.net/publication/271192233_Analysis_of_Bit-Rock_Interaction_During_Stick-Slip_Vibration_Using_PDC_Cutting_Force_Model.
6. Detournay D., Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. International Journal of Rock Mechanics and Geomechanics.1992, vol. 29, no. 1, p. 13–23. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91041-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91041-3).
7. Kessai I., Benammar S., Doghmane M.Z., Tee K.F. Drill Bit Deformations in Rotary Drilling Systems under Large-Amplitude Stick-Slip Vibrations. Applied Science. 2020, 10, 6523. <https://doi.org/10.3390/app10186523>.
8. Zhou Z., Hu, Y., Liu B., Dai K., Zhang Y. Development of Automatic Electric Drive Drilling System for Core Drilling. Applied Science. 2023, 13, 1059. <https://doi.org/10.3390/app13021059>.
9. Simscape Block Libraries. <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
10. Rotational Friction. <https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/rotationalfriction.html>
11. Armstrong B. and C.C. de Wit. Friction Modeling and Compensation, The Control Handbook, CRC Press, 1995.
12. Mechanical Rotational System with Stick-Slip Motion. <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/mechanical-rotational-system-with-stick-slip-motion.html>

Morkun V.S., Morkun N.V., Bobrov E.Y. Hryshchenko Y.O. Modeling of the drill bit interaction mechanism with rock

The study modeled the main components of the interaction between the drill bit and rock during well drilling in the process of ore deposit development to form an information base for automated drilling rig control. In rotary drilling, there are five mechanisms of interaction between the working body of the rig and the rock: tool penetration; cutting of the rock layer; impact chipping of the rock; friction of the tool against the borehole wall; removal of drilling mud from the bottom of the hole. These mechanisms of interaction between the working body of the drilling rig and the rock lead to complex dynamics of the movements of its main functional blocks, which include rotational and translational components. Its dynamic model can be represented as a set of connected elementary basic oscillatory blocks consisting of a spring (a means of storing potential energy), mass or inertia (a means of storing kinetic energy), and a damper (a means by which energy is gradually lost). The mathematical model of a drilling rig can be represented by the equation of motion of the drive system in the above-ground part, the equation of motion of the drilling tool in the well part, and the equation of interaction of the bit with the rock. The mechanism of rock destruction during well drilling is characterized by a pronounced dynamic nature of energy-intensive contact interaction, during which each element of the drill bit is a source of high-amplitude vibroacoustic vibrations, which together characterize this process. Models of both the rotational and translational components of the interaction are proposed. A concomitant effect of the rotational component is the “grabbing-slipping” of the drilling

tool, which occurs when the mechanism of engagement of the drill bit with the formation is nonlinear. This causes the entire drill string to slip or stop. However, if the accumulated torsional energy reaches a certain level, the bit is suddenly released and begins to rotate at high speed. The resulting torsional traveling wave is transmitted to the upper part of the rotation system. The axial movement of the main structural components of the drilling rig depending on the dynamics of the drilling tool is also modeled.

Keywords: control, automation, drilling, well, vibration, modeling, characteristics.

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Пір), morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Бобров Євген Юрійович – аспірант Криворізького національного університету (Кривий Пір), smgrischenko@gmail.com.

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.

Статтю подано 09.09.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-52-57>

УДК 662.758

РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗНОГО КЕРУВАННЯ ПІДВЕДЕННЯМ ЕНЕРГІЇ У ГІБРИДНИХ PEM–PV СИСТЕМАХ СИНТЕЗУ ЗЕЛЕНОГО АМІАКУ

Бзовський І.К., Сергієнко Д.В., Целіщев О.Б.,
Кудрявцев С.О., Лорія М.Г.

DEVELOPMENT OF A LABORATORY INSTALLATION FOR MODEL-BASED CONTROL OF ENERGY SUPPLY IN HYBRID PEM–PV SYSTEMS FOR GREEN AMMONIA SYNTHESIS

Bzovsky I.K., Serhiienko D.V., Tselishchev O.B.,
Kudryavtsev S.O., Loria M.G.

Стаття присвячена розробленню лабораторної установки для дослідження методів модельно-прогнозного керування підведенням енергії в гібридних енерготехнологічних системах синтезу зеленого аміаку на основі PEM-електролізу та фотоелектричної генерації. Актуальність роботи зумовлена глобальним переходом до вуглецево нейтральної енергетики та зростаючою роллю зеленого водню і аміаку як стратегічних енергоносіїв. На відміну від підходів, орієнтованих на оптимізацію окремих підсистем, у дослідженні реалізовано інтегрований метод керування повним технологічним ланцюгом Power-to-Ammonia із урахуванням динаміки енергетичних потоків, змін погодно-кліматичних умов та коливань тарифів на електроенергію.

Запропонована установка включає гібридну систему енергопостачання (PV, акумуляторна батарея, мережа, гібридний інвертор), PEM-електролізер продуктивністю 300 мл Н₂/хв, модуль буферного зберігання та компресії водню, реактор синтезу аміаку за процесом Габера–Боша та автоматизовану систему моніторингу параметрів у реальному часі. На основі зібраних експериментальних даних здійснюється калібрування математичних моделей, перевірка стійкості та точності алгоритмів MPC, а також формування емпіричних залежностей для подальшої оптимізації режимів роботи.

Додатково модельно-прогнозне керування дозволяє враховувати інерційність елементів системи, деградаційні процеси електролізера та нестабільність генерації ВДЕ, що забезпечує гнучку

адаптацію режимів синтезу до зовнішніх збурень. Отримані результати підтверджують можливість зменшення питомої енергоємності синтезу, покращення стабільності технологічного процесу та забезпечення надійного енергопостачання за умов варіативної сонячної генерації. Розроблена експериментальна основа є інструментальною платформою для подальших досліджень і масштабування технології до промислового рівня.

Ключові слова: *зелений аміак; PEM-електроліз; фотоелектрична генерація; модельно-прогнозне керування (MPC); гібридна енергосистема; цифровий двійник; енергоефективність; Power-to-Ammonia.*

Вступ. Світова енергетична система перебуває в стані глибокої структурної трансформації, ключовою метою якої є досягнення повної вуглецевої нейтральності до 2050 року (Net Zero 2050). Такі орієнтири закріплені у стратегічних документах Міжнародного енергетичного агентства (IEA, *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, 2021) та ініціативі ООН UNFCCC Net Zero Coalition, що передбачають системну декарбонізацію економічних секторів шляхом скорочення споживання викопних енергоносіїв, модернізації промислових технологій і масштабного розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Європейський Союз, відповідно до положень Європейського зеленого курсу (European Green Deal, 2019) та Стратегії ЄС з водню (EU Hydrogen Strategy, 2020), визначає розвиток «зеленого» водню та його похідних, зокрема зеленого аміаку, як стратегічний інструмент глибокої декарбонізації енергетики, транспорту й енергоємних галузей промисловості. Такий підхід базується на оцінці водню як універсального носія енергії, здатного забезпечити гнучкість енергосистеми, інтеграцію ВДЕ та формування низьковуглецевих виробничих ланцюгів.

Україна також задекларувала намір перейти до вуглецево нейтральної моделі економічного розвитку, що відображено у Національному плані зі скорочення викидів парникових газів до 2050 року та Концепції розвитку водневої енергетики. У цьому контексті особливого значення набувають технології виробництва, накопичення, транспортування та конверсії зеленого водню, включно із синтезом зеленого аміаку як енергоємного транспортованого носія.

Водночас, попри інтенсивне нарощування наукових і технологічних результатів, актуальною залишається проблема побудови ефективних систем управління енергетичними потоками в гібридних енергетичних комплексах на основі ВДЕ. Саме від оптимальності алгоритмів керування залежить собівартість виробленого зеленого водню та аміаку, рівень їх енергетичної ефективності та стабільність функціонування системи в умовах змінних зовнішніх факторів (погоди, ринку електроенергії, деградації обладнання тощо).

Сучасні тенденції енергетичного переходу до Net Zero 2050 окреслює для наукової спільноти подвійний виклик: одночасно з нарощуванням частки ВДЕ забезпечити їхню техніко-економічну інтеграцію в енергоємні технологічні ланцюги з керованою динамікою. Стратегія IEA визначає водень і його похідні (насамперед аміак) як ключові носії для міжсезонного зберігання енергії, гнучкого балансування систем і декарбонізації важкої промисловості [1], а «Ammonia Technology Roadmap» конкретизує траєкторії зниження питомої енергоємності та вуглецевого сліду по всьому життєвому циклу [5]. Європейський зелений курс та Стратегія ЄС з водню підсилюють цю рамку, акцентуючи на ролі PtX-ланцюгів (Power-to-Hydrogen/Ammonia) у промисловості та транспорті [2, 3]; національні документи України узгоджують напрями з глобальними цілями, що створює нормативне

підґрунтя для експериментальних і прикладних досліджень [4].

У технічній літературі сформовано декілька магістральних ліній досліджень. Перша — це керування гібридними мікромережами з PV та акумуляторними системами в присутності електролізера. Guo та ін. [6] показали ефективність ієрархічної економічної MPC-стратегії (HEMPC) для PV–Electrolyzer–Battery, досягаючи згладжування навантажень і покращення стабільності. Li та ін. [7] продемонстрували комбінований DP-MPC, який поєднує глобальний пошук динамічного програмування з локальною адаптивністю MPC, що зменшує експлуатаційні витрати у реальному часі. Syed і Khalid [8] інтегрували нейромережеві апроксимації динаміки в MPC для комплексу PV–Wind–Battery–Electrolyzer–Fuel Cell, підвищивши точність прогнозування та робастність до збурень.

Друга лінія — безпосереднє керування процесами синтезу аміаку в «зелених» схемах. Syed і Kazergani [9] застосували NN MPC до електрохімічного синтезу аміаку, фокусуючись на стабілізації продуктивності й обмеження процесу; робота демонструє потенціал «м'яких» моделей для високонелінійних об'єктів. Shihui та ін. [10] запропонували дворівневу MPC-архітектуру для зв'язаного комплексу Hydro–PV–Electrolyzer–Ammonia Synthesis, що координує розподіл потужності між підсистемами та регулює режими синтезу.

Попри суттєвий поступ, окреслюються спільні обмеження наявних підходів. По-перше, більшість робіт орієнтовано на локальну оптимізацію фрагментів системи (енергетичної мікромережі або окремого реакторного/електролізерного вузла), що знижує глобальну оптимальність у повному PtA-ланцюгу. По-друге, у значній частині моделей використано статичні або квазістатичні представлення ключових блоків (наприклад, PEM-електролізера), що обмежує адекватність до швидкоплинних режимів і перехідних процесів [6–8, 10]. По-третє, слабо відображено зовнішні стохастичні фактори — часово-залежні тарифи, прогноз погоди, обмеження ринку та деградаційні механізми електрохімічних і накопичувальних підсистем; відтак економічні KPI (LCOA, питомі енерговитрати) оптимізуються фрагментарно [5–7, 10].

Додатковим методологічним розривом є недостатня інтеграція інструментів «цифрового двійника» (Digital Twin) для наскрізної валідації MPC-стратегій у пов'язаних доменах:

електроенергетика — електрохімія — тепло- і масообмін. Хоч окремі праці торкаються аспектів моделювання й ідентифікації, повнофункціональні двійники, які відтворюють термодинаміку синтезу аміаку разом із деградацією PEM та керуванням буферним зберіганням H_2 , у літературі представлені обмежено [6–10].

Таким чином, узагальнення джерел показує потребу у: інтегрованих MPC-схемах, що охоплюють повний PtA-ланцюг з урахуванням міжсистемних зв'язків; експліцитному включенні прогнозів ПВ-генерації, тарифів і деградації в критеріальні функції та обмеження; використанні цифрових двійників для прискореного тестування політик керування і трансферу їх на фізичні стенди; експериментальній верифікації з послідовним калібруванням моделей. Саме ці прогалини адресує запропонована в роботі методика: єдина цифрова MPC-архітектура для Power-to-Ammonia, підкріплена Digital Twin у DWSIM і лабораторним стендом PEM–PV із модулем буферного H_2 та реактором Габера–Боша. Така комбінація дозволяє перейти від локальної оптимізації підсистем до економічно орієнтованої координації всього технологічного контуру, що узгоджено зі стратегічними орієнтирами IEA та ЄС [1–5].

Сучасні дослідження засвідчують перспективність застосування методів модельно-прогнозного керування (MPC) у таких енергетичних системах. Наприклад, у праці Guo та ін. (2025) запропоновано ієрархічну економічну MPC-стратегію (HEMPC) для комплексу PV–Electrolyzer–Battery, яка забезпечує зниження коливань навантаження та підвищення стійкості енергосистеми. У роботі Li et al. (2024) представлено гібридний алгоритм DP-MPC для керування мікромережею, що поєднує глобальну оптимізацію динамічного програмування з адаптивними властивостями MPC, демонструючи ефективне балансування енергетичних потоків та скорочення експлуатаційних витрат. Syed і Khalid (2023) застосували MPC з використанням нейронної мережі для моделювання динаміки системи PV–Wind–Battery–Electrolyzer–Fuel Cell, що дозволило підвищити точність прогнозування поведінки мікромережі.

Однак більшість зазначених підходів орієнтовано на локальну оптимізацію та не охоплює повної інтеграції етапів виробництва, буферного зберігання водню та синтезу аміаку в умовах змінних цінових та природно-

кліматичних параметрів. Зокрема, у дослідженні Syed і Kazerani (2024) було запропоновано нейромережеву MPC-схему (NNMPC) для регулювання процесів електрохімічного синтезу аміаку, однак модель не враховує деградаційні процеси в обладнанні та зміни тарифів на електроенергію. У роботі Y. Shihui та ін. (2025) реалізовано дворівневу MPC-стратегію для комплексу Hydro–PV–Electrolyzer–Ammonia Synthesis, проте її основою є спрощена статична модель PEM-електролізера, що обмежує здатність системи до адаптації в реальних динамічних умовах.

Тому розробка лабораторної установки для модельно-прогнозного керування підведенням енергії у гібридних рет–рв системах синтезу зеленого аміаку є актуальною задачею.

Основна частина. На відміну від наявних підходів, які здебільшого зосереджуються на оптимізації роботи окремих підсистем гібридної енергетичної інфраструктури (фотоелектричних модулів, систем акумуляції енергії або електролізерних установок), запропонована в цьому проєкті методологія має комплексний та інтегрований характер. Її сутність полягає у формуванні єдиної керованої енерготехнологічної системи типу *Power-to-Ammonia*, що забезпечує узгоджене функціонування усіх ключових етапів виробничого процесу — від перетворення сонячної енергії до синтезу зеленого аміаку. У межах даного підходу передбачається реалізація таких принципових положень:

- Інтеграція повного технологічного ланцюга Power-to-Ammonia в єдину цифрову модельно-прогнозну архітектуру керування (MPC), що дозволяє враховувати міжсистемні взаємозв'язки, залежності потоків енергії та речовин, а також забезпечує оптимізацію функціонування системи в цілому, а не її окремих елементів.

- Використання оперативних прогнозів погодно-кліматичних умов та тарифів на електроенергію в режимі реального часу, що дає змогу реалізувати адаптивні стратегії керування, враховувати стохастичний характер генерації ВДЕ та мінімізувати витрати на енергозабезпечення процесу електролізу та синтезу аміаку.

- Розроблення цифрового двійника (Digital Twin) у середовищі DWSIM, який відтворює фізико-хімічну, термодинамічну та електроенергетичну поведінку системи. Цифровий двійник слугує інструментом для тестування, порівняння та оптимізації варіантів

стратегії керування без втручання у реальний технологічний процес, що знижує експериментальні ризики та витрати.

- Зниження питомої енергоємності та собівартості виробництва зеленого аміаку шляхом оптимального розподілу активної та реактивної потужності, раціоналізації режимів роботи електролізера та теплоенергетичного блока синтезу, а також мінімізації простоїв та неефективних фаз роботи обладнання.

- Експериментальна верифікація математичної моделі та системи керування на фізичному стенді, що забезпечує підтвердження адекватності, надійності та практичної реалізованості запропонованого підходу в умовах реального технологічного циклу.

Таким чином, створення установки синтезу зеленого аміаку лабораторного масштабу орієнтований не лише на дослідження підвищення ефективності окремих енергетичних компонентів, але й на формування цілісної інтелектуально-керованої інфраструктури виробництва зеленого аміаку, здатної функціонувати в умовах варіативності зовнішніх впливів та ринкових параметрів, що є критично важливим для впровадження водневої енергетики у промисловий масштаб.

Метою є розробка ефективної системи селективного підведення енергії до установки синтезу зеленого аміаку на основі процесу Габера–Боша та PEM-електролізу.

Для цього необхідно розробити та побудувати експериментальну установку лабораторного масштабу для верифікації математичної моделі, алгоритмів керування та тестування роботи ключових підсистем, включно згібридною системою енергопостачання, PEM-електролізером, буферним зберіганням і компресією водню, подачею азоту та підготовкою реагентів, модулем синтезу аміаку, системою відокремлення та збору продукту, а також автоматизованою системою моніторингу.

Для підтвердження коректності розробленої математичної моделі та оцінки ефективності алгоритмів модельно-прогнозного керування було створено експериментальну лабораторну установку, яка реалізує технологічний ланцюг виробництва зеленого водню та синтезу аміаку в малому масштабі. Основним елементом установки є PEM-електролізер із продуктивністю близько 300 мл H_2 /хв, що забезпечує потенційний вихід до 0,18 кг NH_3 на добу залежно від параметрів рециркуляції та режимів синтезу.

Експериментальна установка має модульну структуру та включає такі основні підсистеми:

- Гібридна система енергопостачання, яка об'єднує фотоелектричні панелі, акумуляторну батарею, мережеве резервне живлення та гібридний інвертор для балансування потоків електроенергії та стабілізації навантаження.

- PEM-електролізер, що виконує електрохімічне розкладання води з отриманням водню високої чистоти.

- Система буферного зберігання та компресії водню, яка забезпечує згладжування коливань у його подачі на подальші стадії процесу.

- Модуль синтезу аміаку за процесом Габера–Боша з можливістю регулювання основних технологічних параметрів (тиску, температури, співвідношення реагентів).

- Автоматизована система моніторингу та збору даних, що включає датчики тиску, температури, витрати газових потоків, а також електричних параметрів (напруга, сила струму, споживана та віддана потужність).

Під час експериментів здійснюється реєстрація часових рядів параметрів роботи кожної підсистеми. Отримані дані використовуються для калібрування математичної моделі, ідентифікації динамічних характеристик елементів системи, а також для оцінювання точності та стійкості алгоритмів модельно-прогнозного керування. На основі експериментальних вимірювань формуються регресійні та емпіричні залежності, що дозволяють врахувати реальні втрати, інерційність та межі робочих режимів обладнання.

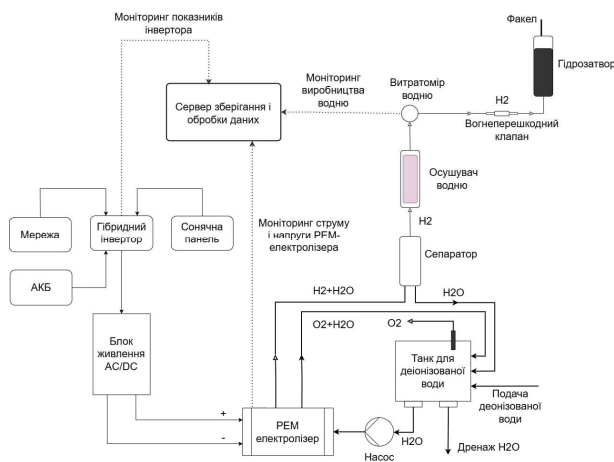


Рис. Схема лабораторної установки PEM-електролізу потужністю 300 мл/хв

Опис технологічної схеми лабораторної установки PEM-електролізу

Живлення установки здійснюється від гібридної енергетичної системи, яка включає фотоелектричну панель, акумуляторну батарею та гібридний інвертор, що працює в режимі SBU (Solar – Battery – Utility). У цьому режимі забезпечується пріоритетне використання енергії від сонячної панелі; у разі її недостатності живлення надходить від акумуляторної батареї, а при її розряді або відсутності сонячного випромінювання — від електромережі. Інвертор подає живлення на AC/DC-перетворювач, який живить установку постійним струмом з можливістю плавного регулювання сили струму до 20 А. Це дає змогу досліджувати роботу PEM-електролізера за різних навантажень.

До бака подається деіонізована вода, що відповідає вимогам до максимальної електропровідності не більше ніж 2 мкСм/см. Вода за допомогою насоса через фільтр очищення надходить до PEM-електролізера, у якому відбувається електролітичне розкладання води на водень і кисень.

Отримані продукти відводяться окремими каналами:

- кисень відводиться у атмосферу;
- водень проходить через осушувач на основі силікагелю, після чого надходить до масового витратоміра, який вимірює об'ємну витрату в діапазоні 0–500 мл/хв із точністю $\pm 1,5\%$.

Після вимірювання водень спрямовується через гідрозатвор і вогнеперешкодний клапан, які виконують функцію зворотного захисту, запобігаючи потраплянню повітря або полум'я назад у систему. На кінцевому етапі водень спалюється на факелі, що забезпечує безпечно відведення продуктів реакції.

Для підвищення безпеки всі силові лінії обладнані автоматичними вимикачами:

- між інвертором і акумуляторною батареєю — для захисту від перевантаження та короткого замикання;
- між мережею та інвертором — для захисту від перенапруги з боку мережі;
- між інвертором та електролізером — для оперативного відключення електролізера у разі несправності.

Моніторинг параметрів системи здійснюється за допомогою контролера Arduino UNO R4 Wi-Fi та датчиків, які вимірюють силу

струму та напругу на клеммах електролізера. Отримані дані передаються на сервер збору та обробки інформації по протоколу UART, де виконуються їх збереження і аналіз. Дані моніторингу виробництва водню, а також споживання енергії від фотоелектричної панелі, АКБ і мережі надходять на сервер по протоколу RS485.

Лабораторна установка забезпечує повний цикл виробництва водню використовуючи енергію сонячної генерації (окрім етапу очищення і деіонізації води).

Установка PEM-електролізу змонтована у металевому корпусі, який містить насос, бак для дистильованої води, фільтр, сепаратор і AC/DC-перетворювач для живлення електролізера (розрахований на максимальний струм 20 А) з можливістю регулювання сили струму. Містить виходи під кисень і водень (зовнішній діаметр 8мм, використовуються поліуретанові з'єднувальні трубки), дренажний отвір та отвір для подачі води.

Висновок. Було розроблено та створено установку синтезу зеленого аміаку лабораторного масштабу на основі PEM-електролізу та гібридної енергосистеми, яка дозволить реалізувати алгоритми MPC для селективного підведення енергії до установки. Запровадження MPC дозволить оптимізувати використання енергії з різних джерел живлення, забезпечуючи їх узгоджену роботу та стабільне енергопостачання за умов змінної сонячної генерації.

Література

1. International Energy Agency (IEA), *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris: IEA, 2021.
2. European Commission, *The European Green Deal*. COM(2019) 640 final, Brussels, 2019.
3. European Commission, *A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe*. COM(2020) 301 final, Brussels, 2020.
4. Ministry of Energy of Ukraine, *Concept for the Development of Hydrogen Energy in Ukraine*. Kyiv, 2021. (in Ukrainian)
5. International Energy Agency (IEA), *Ammonia Technology Roadmap: Towards More Sustainable Nitrogen Fertilizer Production*. Paris: IEA, 2021.
6. X. Guo, F. Gu, H. Liu, Y. Yu, R. Li, and J. Wang, "Sustainable PV-hydrogen-storage microgrid energy management using a hierarchical economic model predictive control framework," *Energy Informatics*, vol. 8, no. 18, 2025.
7. Q. Li, X. L. Zou, Y. C. Pu, and W. R. Chen, "Real-time energy management method for electric-

- hydrogen hybrid energy storage microgrids based on DP-MPC,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 324–333, 2024.
8. M. A. Syed and M. Khalid, “An intelligent model predictive control strategy for stable solar–wind renewable power dispatch coupled with hydrogen electrolyzer and battery energy storage,” *International Journal of Energy Research*, vol. 2023, pp. 1–17, Mar. 2023, doi: 10.1155/2023/4531054.
 9. M. A. Syed and M. Kazerani, “A neural network-based model predictive approach for controlled electrochemical green ammonia production,” in *Proc. IECON 2024 - 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/IECON55916.2024.10905904.
 10. Y. Shihui, Z. Lu, Z. Liu, G. Zhao, and H. Liu, “Double-layer power optimisation and regulation method for hydro-photovoltaic hydrogen production ammonia synthesis coupling system,” *Electric Power Systems Research*, vol. 248, p. 111887, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.eprsr.2025.111887.

Bzovsky I.K., Serhiienko D.V., Tselishchev O.B., Kudryavtsev S.O., Loria M.H. Development of a laboratory installation for model-based control of energy supply in hybrid PEM–PV systems for green ammonia synthesis

The article is devoted to the development of a laboratory setup for researching methods of model-based predictive control of energy supply in hybrid energy technology systems for green ammonia synthesis based on PEM electrolysis and photovoltaic generation. The relevance of the work is due to the global transition to carbon-neutral energy and the growing role of green hydrogen and ammonia as strategic energy carriers. Unlike approaches focused on optimising individual subsystems, the study implements an integrated method for controlling the entire Power-to-Ammonia technological chain, taking into account the dynamics of energy flows, changes in weather and climate conditions, and fluctuations in electricity tariffs.

The proposed installation includes a hybrid power supply system (PV, storage battery, grid, hybrid inverter), a PEM electrolyser with a capacity of 300 ml H₂/min, a hydrogen buffer storage and compression module, an ammonia synthesis reactor based on the Haber-Bosch process, and an automated real-time

parameter monitoring system. Based on the collected experimental data, mathematical models are calibrated, the stability and accuracy of MPC algorithms are verified, and empirical dependencies are formed for further optimisation of operating modes.

In addition, model predictive control allows for the inertia of system elements, electrolyser degradation processes, and the instability of renewable energy generation to be taken into account, ensuring flexible adaptation of synthesis modes to external disturbances. The results obtained confirm the possibility of reducing the specific energy consumption of synthesis, improving the stability of the technological process, and ensuring a reliable energy supply under conditions of variable solar generation. The developed experimental basis is an instrumental platform for further research and scaling of the technology to an industrial level.

Keywords: green ammonia; PEM electrolysis; photovoltaic generation; model predictive control (MPC); hybrid energy system; digital twin; energy efficiency; Power-to-Ammonia.

Бзовський Ігор Костянтинівич – аспірант факультету інженерії Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, asp-161-23-14@snu.edu.ua

Сергієнко Дмитро Васильович – аспірант факультету інженерії Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, sergienko_dmitri@ukr.net

Целішев Олексій Борисович – д.т.н., професор, проректор з наукової роботи, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, celishev@snu.edu.ua

Кудрявцев Сергій Олександрович – к.т.н., доцент, декан факультету інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, kudryavcevev@snu.edu.ua

Лорія Марина Геннадіївна – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп’ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, m_loria@snu.edu.ua

Статтю подано 08.09.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-58-65>

УДК 67.02

КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ВЕТЕРИНАРНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО КРОХМАЛЮ

Іщенко О.В., Страшний В.В., Кучинська Д.А.,
Ресницький І.В., Харитоненко Г.І., Кучинська М.А.

COMPOSITE MATERIAL FOR VETERINARY PURPOSES BASED ON MODIFIED STARCH

Ishchenko O.V., Strashnyi V.V., Kuchynska D.A.,
Resnytskyi I.V., Kharitonenko G.I., Kuchynska M.A.

У статті розглянуто розробку композиційних матеріалів ветеринарного призначення на основі модифікованого крохмалю з метою створення нових антимікробних плівок-носіїв для трансдермальних терапевтичних систем. Методологія дослідження передбачала хімічну модифікацію картопляного крохмалю лимонною та молочною кислотами за різних умов, а потім його комбінування з полівініловим спиртом та ксероформом як активним фармацевтичним інгредієнтом. Реологічні властивості отриманих композицій вивчали методом ротаційної віскозиметрії. Встановлено, що всі розроблені розчини демонструють псевдопластичні властивості ($n < 1$) та характеризуються зниженням в'язкості зі збільшенням швидкості зсуву. Доведено, що лимонна кислота, завдяки своїй багатофункціональності, сприяє утворенню ковалентно-зшитой мережевої структури, що призводить до підвищення в'язкості розчинів. Натомість, молочна кислота, маючи лише одну карбоксильну групу, виявилася менш ефективною для міжмолекулярного зшивання, а в деяких випадках каталізувала частковий гідроліз крохмалю. Результати підтверджують, що в'язкість композицій значно зростає зі збільшенням вмісту полівінілового спирту та при додаванні ксероформу, особливо для сумішей на основі крохмалю, модифікованого молочною кислотою. Додатково були вивчені кінетичні та ємнісні характеристики адсорбції метиленового синього (МС) як модельного контамінанта. Встановлено, що плівки з високим вмістом модифікованого крохмалю, зокрема ті, що були модифіковані молочною кислотою, демонструють високу сорбційну здатність. Це вказує на подвійну функціональність та перспективність використання розроблених

матеріалів: вони здатні не лише слугувати матрицею для вивільнення лікарських речовин, але й одночасно виконувати функцію сорбенту для очищення раневого ложа від ексудату та токсичних сполук, що є ключовим фактором у прискореному загоєнні ран. Отримані дані демонструють перспективність використання розроблених матеріалів для створення нового покоління ефективних засобів для лікування пошкоджень шкірного покриву у ветеринарії.

Ключові слова: модифіковані полісахариди, активний фармацевтичний інгредієнт, композиційний матеріал, полівініловий спирт, крохмаль, реологія, ксероформ.

Вступ. Застосування полімерних матеріалів у різних галузях промисловості обумовлене комплексом фізико-хімічних властивостей, специфічних для кожної галузі окремо, включаючи фармацевтичну та ветеринарну [1].

Біополімери різного походження активно досліджуються для застосування в біомедицині завдяки своїй біосумісності, біорозкладаності, нетоксичності, низькій вартості та універсальності. Розробка численних функціоналізованих систем на основі біополімерів з покращеними фізико-хімічними, механічними та біологічними властивостями ще більше розширила їх потенціал у сфері доставки ліків.

Будь-яке ураження шкіри супроводжується підвищеним ризиком розвитку інфекційного процесу в рані, а опікова травма

характеризується наявністю значної пошкодженої поверхні. Бактеріальне забруднення ран та опіків суттєво ускладнює перебіг захворювання, особливо на тлі імунодефіцитного стану, який розвивається в таких випадках. Інфікування, інтоксикації та прискорення термінів утворення епітелію рани є пріоритетними у лікуванні пошкоджень шкірного покриву [2].

Розробка композиційних матеріалів ветеринарного призначення на основі біосумісних полімерів є одним з пріоритетних напрямків у розвитку сучасної фармацевтичної та хімічної промисловості. Це пояснюється тим, що використання таких матеріалів сприяє підвищенню ефективності лікування тварин, зниженню побічних ефектів та полегшенню процесу догляду за ними. Композиційні матеріали на основі біосумісних полімерів відкривають нові можливості у створенні ветеринарних плівок, імплантів та покриттів, які забезпечують контрольоване вивільнення лікарських речовин, прискорюють загоєння ран та мінімізують ризик інфекційних ускладнень [3,4].

Метою роботи є одержання композиційних матеріалів ветеринарного призначення на основі модифікованого крохмалю, які забезпечують розробку нових антимікробних плівок-носіїв для трансдермальних терапевтичних систем.

Основний матеріал. З точки зору охорони здоров'я, біоматеріали можна визначити як матеріали, що володіють деякими новими властивостями, які роблять їх придатними для безпосереднього контакту з живою тканиною без виникнення будь-яких несприятливих реакцій імунного відторгнення.

Природні полімери широко використовуються в галузі охорони здоров'я для виготовлення систем доставки ліків. Оскільки природні біоматеріали мають невисоку механічну міцність, їх застосування як носіїв ліків обмежене. Тому такі матеріали хімічно модифікують для покращення їх механічних властивостей та прив'язка функціональних біологічно активних груп. Під час виготовлення цих біоматеріалів необхідно підтримувати баланс між фізичними та механічними властивостями разом з мінімальною токсичністю для тканин [5].

Однак біоматеріали повинні бути отримані з достатньою та відтвореною чистотою та якістю [6]. Також одним із важливих напрямів – є композиційні матеріали на основі синтетичних та природних полімерів [7]. Гідрогелі на основі

біополімерів викликали великий інтерес у тканинній інженерії та застосуванні для доставки ліків [8]. Незважаючи на відомі переваги та широке застосування біоматеріалів, існують деякі обмеження, такі як погані механічні властивості та низька стабільність у водному середовищі, що обмежує їх використання для біомедичних застосувань [9]. Однак гідрогелі мають широкий спектр функціональних груп, включаючи гідроксильні, аміно- та карбоксильні групи, які можуть бути додатково зшиті та кон'юговані з лігандами, що націлені на клітини. Природними біополімерами є полісахариди, типовими прикладами яких є хітозан, гіалуронова кислота, декстран, пуллулан та альгінат. Міцність міжфазного зв'язку залежить від багатьох факторів, таких як природа матеріалів, що використовуються, площа поверхні розділу фаз, чистота поверхні, спосіб змішування та умови обробки. Щоб покращити адгезію між двома різнорідними матеріалами, можна використовувати різні методи, такі як фізична адсорбція, хімічна реакція або додавання зв'язуючого агента [10].

Застосування біополімерів у сфері трансдермальної доставки призводить до нової парадигми шляхом маніпулювання фізичними, хімічними та біологічними властивостями молекул ліків, що дозволяє їм долати шкірні бар'єри та розширювати місцевий або системний ефект для кращих клінічних результатів.

Полісахариди відіграють фундаментальну роль у всіх живих організмах, оскільки основний метаболізм базується на перетворенні вуглецю та енергії. Це перетворення є важливим як для автотрофного, так і для гетеротрофного живлення і залишається зосередженим на вуглеводах.

Завдяки своїм функціональним властивостям, біорозкладаності, відновлюваності та широкій доступності, крохмаль знаходить широке застосування в різних галузях промисловості. У харчовій промисловості він виконує кілька функцій як гелеутворювач, загусник, стабілізатор емульсії та замітник жиру. Крохмаль також використовується у фармацевтичному виробництві, виробництві паперу, дизайні пакувальних матеріалів, формулюванні клеїв та текстильному виробництві.

Модифікація крохмалю за допомогою таких агентів, як ангідриди, окислювачі та бензили, спрямована на внесення специфічних

змін у його хімічні, фізичні або функціональні властивості. Ця модифікація може підвищити хімічну реакційну здатність крохмалю, тим самим сприяючи утворенню нових функціональних груп. Крім того, вона може регулювати розчинність крохмалю в різних розчинниках, що є вирішальним для його використання в різних рецептурах, таких як клеї, покриття, фармацевтичні препарати та харчові продукти. Більше того, вона може дозволити модифікувати в'язкість та гідрофобність крохмалю, як це видно у випадку модифікації крохмалю за допомогою бензилброміду, що є перевагою в таких застосуваннях, як загусники, сполучні речовини та текстуруючі агенти, що використовуються в харчових продуктах, фармацевтичних препаратах та засобах особистої гігієни. Тому важливо досліджувати відповідні методики модифікації крохмалю для покращення його характеристик та розширення його потенційних застосувань [9].

Хімічні модифікації вводять нові функціональні групи без зміни морфології гранул або розподілу їх розмірів. Ці зміни впливають на фізико-хімічні властивості крохмалю, викликаючи структурні модифікації, які роблять його придатним для різноманітних промислових застосувань. Ці хімічні коригування впливають на поведінку крохмалю, властивості тіста, здатність до желатинізації та силу ретроградації. Таким чином, ці хімічні модифікації мають потенціал для покращення характеристик крохмалю та розширення його використання як у харчовій, так і в нехарчовій промисловості [11].

Для зміни молекулярної конфігурації та функціональних характеристик крохмалів застосовуються різні хімічні зміни, такі як зшивання, естерифікація, етерифікація, окислення та кислотний гідроліз. Ці методи хімічної модифікації служать ефективним засобом для покращення певних аспектів функціональності крохмалю, таких як набухання, желатинізація та ретроградація. Основною метою є задоволення специфічних вимог промислових застосувань.

Розробка ефективних плівок вимагає глибоких знань фармакологічних та фармацевтичних властивостей ліків та полімерів, а також відповідного вибору виробничих процесів [12].

Дослідження. Для одержання плівок трансдермальних систем використовували модифікований крохмаль, полівініловий спирт та активний фармацевтичний інгредієнт.

Модифікований крохмаль отримували шляхом обробки картопляного крохмалю (ДСТУ 4286:2004) лимонною (ДСТУ 908:2006) та молочною (ДСТУ 4621:2006) кислотами концентраціями 0,5 моль/л та 1,0 моль/л, час обробки (1,5; 2,0; 2,5 годин), при постійній температурі 40°C.

Полівініловий спирт (ПВС) ТУ 2215-088-00203766-2007 – білий гранульований порошок, водорозчинний синтетичний неіонний полімер, з помірними мукоадгезивними властивостями [13].

Ксероформ (UA/12732/01/01) – вісмуту трибромфенолят (2,4,6-трибромфенолят вісмуту основний). Молярна маса – 1198,35 г/моль. Аморфний порошок жовтого кольору зі слабким специфічним запахом зі структурною формулою представленою на рис.1. Брутто формула: $C_{18}H_6BiBr_9O_3$.

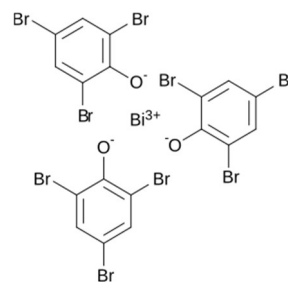


Рис. 1. Структурна формула ксероформу

Виготовлення плівок з початку готували 10 % розчинів модифікованого крохмалю (МК) та полівінілового спирту (ПВС 17-99). Вибір цієї концентрації був зумовлений попередніми дослідженнями, які вказували на оптимальні плівкоутворювальні характеристики для обох полімерів.

Готували 10%-й розчин ПВС при температурі 85-90 °С на водяній бані при постійному перемішуванні протягом 35-40 хв. Використовували воду 3-го класу чистоти та додавали гліцерин в якості пластифікатора 2 мас.%. Після приготування окремих розчинів їх змішували в пропорціях МК:ПВС 25:75, 50:50 та 75:25 та додавали ксероформ 10 мас.% (від кількості сухих речовин композиції). Формування плівок проводили методом поливу з розчину на підложку, з подальшим сушінням при температурі 45-50 °С протягом 90-120 хв в сушильній шафі.

Для вимірювання в'язкості був обраний віскозиметр «Vevor NDJ-5D» (цифровий ротаційний віскозиметр) з температурним інтервалом 23–25 °С.

В'язкість розчинів на основі модифікованого крохмалю з ПВС підпорядковується ступеневому закону та характеризується рівнянням (1) Оствальда – де Вілла:

$$\eta = K \cdot \gamma^{n-1} \quad (1)$$

Результати. В композиціях зі збільшенням кількості ПВС спостерігається зниження константи рівняння n, що вказує на збільшення структурованості K.

Таблиця 1

Значення констант K та n для розчинів модифікованого крохмалю та ПВС

Модифікація крохмалю	0,5 моль		1 моль	
	K, Па*с	n	K, Па*с	n
Лимонна кислота 1,5 год				
МК/ПВС 25/75	6,41	0,61	6,53	0,61
МК/ПВС 50/50	6,02	0,69	6,21	0,66
МК/ПВС 75/25	5,74	0,73	6,08	0,68
Лимонна кислота 2,0 год				
МК/ПВС 25/75	6,36	0,62	6,69	0,60
МК/ПВС 50/50	6,18	0,68	6,35	0,66
МК/ПВС 75/25	5,89	0,69	6,22	0,69
Лимонна кислота 2,5 год				
МК/ПВС 25/75	6,44	0,62	6,76	0,62
МК/ПВС 50/50	6,25	0,67	6,43	0,64
МК/ПВС 75/25	5,97	0,68	6,29	0,65
Молочна кислота 1,5 год				
МК/ПВС 25/75	7,69	0,37	7,69	0,38
МК/ПВС 50/50	7,58	0,39	7,65	0,34
МК/ПВС 75/25	6,72	0,61	7,61	0,37
Молочна кислота 2 год				
МК/ПВС 25/75	7,84	0,36	7,71	0,38
МК/ПВС 50/50	7,72	0,38	7,81	0,40
МК/ПВС 75/25	6,74	0,59	6,94	0,41
Молочна кислота 2,5 год				
МК/ПВС 25/75	7,80	0,36	7,67	0,34
МК/ПВС 50/50	7,66	0,38	6,26	0,56
МК/ПВС 75/25	6,84	0,58	5,81	0,78

Встановлено, що всі досліджені розчини композицій відносяться до псевдопластичних систем (аномально в'язких структурованих систем, де n<1), при цьому з ростом швидкості зсуву спостерігається зниження в'язкості.

Таблиця 2

Значення констант K та n для розчинів модифікованого крохмалю та ПВС з ксероформом

Модифікація крохмалю	0,5 моль		1,0 моль	
	K, Па*с	n	K, Па*с	n
Лимонна кислота 1,5 год				
МК/ПВС 25/75	6,41	0,67	6,58	0,61
МК/ПВС 50/50	6,06	0,69	6,39	0,66
МК/ПВС 75/25	5,78	0,72	6,51	0,67
Лимонна кислота 2,0 год				
МК/ПВС 25/75	6,40	0,67	6,72	0,59
МК/ПВС 50/50	6,21	0,68	6,53	0,65
МК/ПВС 75/25	5,93	0,69	6,25	0,66
Лимонна кислота 2,5 год				
МК/ПВС 25/75	6,50	0,64	6,79	0,60
МК/ПВС 50/50	6,29	0,65	6,62	0,64
МК/ПВС 75/25	6,00	0,67	6,22	0,65
Молочна кислота 1,5 год				
МК/ПВС 25/75	11,55	0,33	7,70	0,40
МК/ПВС 50/50	7,81	0,40	7,76	0,38
МК/ПВС 75/25	7,10	0,52	7,89	0,36
Молочна кислота 2,0 год				
МК/ПВС 25/75	8,10	0,25	7,84	0,36
МК/ПВС 50/50	7,77	0,59	7,78	0,41
МК/ПВС 75/25	6,89	0,60	7,02	0,61
Молочна кислота 2,5 год				
МК/ПВС 25/75	7,82	0,33	7,72	0,34
МК/ПВС 50/50	7,71	0,37	6,62	0,53
МК/ПВС 75/25	7,14	0,49	5,86	0,76

В композиціях на основі полісахаридів з ксероформом, зі збільшення кількості ПВС спостерігається зниження константи рівняння n, що вказує на збільшення структурованості K.

Аналіз графічних даних підтверджує зниження початкової в'язкості дисперсій зі збільшенням вмісту модифікованого крохмалю в досліджуваному діапазоні концентрацій (рис.3.7-3.10). При цьому тип модифікатора (лимонна чи молочна кислота) та його концентрація, використана для модифікації крохмалю, мають суттєвий вплив на абсолютні значення в'язкості та динаміку її зміни. Зокрема, можна спостерігати відмінності у в'язкісних характеристиках крохмалю, модифікованого лимонною кислотою, порівняно з модифікованим молочною кислотою за еквівалентних умов.

У процесі кислотно-каталізованої модифікації крохмалю відбувається взаємодія карбоксильних груп з його полісахаридною матрицею, що призводить до утворення ковалентних зв'язків між макромолекулами крохмалю і, як наслідок, до зниження ступеня полімеризації розчину. Цей феномен детермінується тим, що карбоксильні групи, початково присутні у реакційному середовищі, поступово інкорпуються в структуру крохмалю, де вони каталізують процеси розгалуження та гідролітичного розщеплення [14]. Внаслідок цього концентрація вільних полімерних фрагментів у розчині зменшується, що корелює зі зниженням ступеня полімеризації. Аналіз спектральних характеристик розчинів, використаних для обробки крохмалю, підтверджує зниження кількості карбоксильних груп, що є безпосереднім доказом їхнього приєднання до крохмальних ланцюгів.

Лимонна кислота, будучи трипротонною кислотою, функціонує як багатфункціональний крос-лінкер. Її взаємодія з крохмалем сприяє не лише гідролітичному руйнуванню глікозидних зв'язків, але й естерифікації гідроксильних груп крохмалю. Цей процес призводить до формування ковалентно-зшитої мережевої структури, яка зумовлює підвищений ступінь полімеризації порівняно з нативним крохмалем [15].

На відміну від лимонної кислоти, молочна кислота, як одноосновна карбонова кислота, має лише одну карбоксильну групу, що суттєво обмежує її здатність до міжмолекулярної зшивки. Крім того, при підвищенні температури вона може каталізувати частковий гідроліз крохмалю, що веде до деградації полімерних ланцюгів і, як наслідок, до зниження середньої молекулярної маси та ступеня полімеризації [16].

Сорбційна ємність метиленового синього була досліджена як репрезентативний критерій для оцінки потенціалу матеріалу секвестувати та елімінувати катіонні сполуки або інші розчинні контамінанти з ексудату ранових поверхонь. Метиленовий синій (МС) є катіонним хромофором, що слугує модельним аналогом контамінанту в адсорбційних дослідженнях, а також застосовується як барвник у мікробіології та індикатор у тестах на життєздатність клітин. Як позитивно заряджений хромофор, МС ефективно забарвлює електронегативні мікробні клітини. Позитивні хромофори МС адсорбуються на негативно заряджених

клітинних стінках, що робить його широко використовуваним "позитивним барвником". Електростатична взаємодія виступає основним рушійним фактором його поглинання та взаємодії з бактеріями [17]. З метою прецизійного кількісного аналізу концентрації метиленового синього (МС) в експериментальних зразках була розроблена калібрувальна залежність. Цей етап є фундаментальним аспектом спектрофотометричного аналізу, оскільки він дозволяє встановити валідну кореляцію між вимірюваною оптичною щільністю (абсорбцією) та відомою концентрацією аналіту [16]. Отримані дані, візуалізовані на рисунку 2, свідчать про високу сорбційну здатність усіх протестованих композицій плівок щодо метиленового синього. Було зафіксовано, що в динаміці поглинання МС спостерігалось зростання зі збільшенням часу контакту для всіх зразків, досягаючи високих сорбційних показників вже протягом 60-хвилинного періоду спостереження. Примітно, що максимальний відсоток адсорбції, зафіксований серед досліджених композицій за 60 хвилин, перевищив 50 %, що однозначно свідчить про високу адсорбційну ефективність розроблених композиційних плівок.

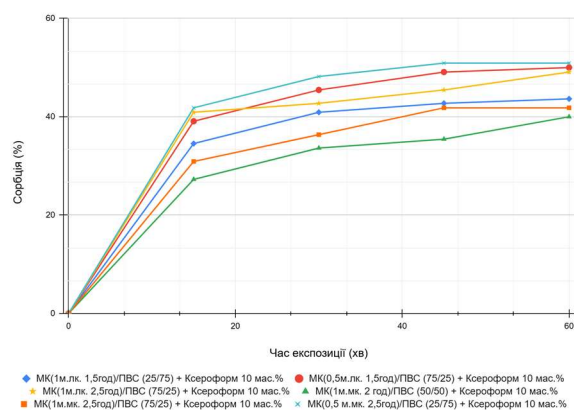


Рис. 2. Кінетика поглинання метиленового синього плівками на основі МК/ПВС з ксероформом

Кінетичні та ємнісні характеристики адсорбції метиленового синього були детерміновані як співвідношенням модифікованого крохмалю до полівінілового спирту у складі композиційної плівки, так і специфічними параметрами модифікації крохмалю, включаючи тип та молярну концентрацію органічної кислоти, а також тривалість реакції. Зокрема, композиції зі співвідношенням МК/ПВС 25:75, модифіковані

молочною кислотою (0,5 моль/л, 2,0 год), виявили найвищий адсорбційний відсоток, що становив 50,91 % після 60 хвилин контакту. Незважаючи на варіабельність кінетики адсорбції між різними зразками, всі композиції послідовно демонстрували високі сорбційні можливості.

Висока ефективність адсорбції метиленового синього підтверджує значний потенціал розроблених плівок щодо сорбції та елімінації не тільки раневого ексудату, а й інших шкідливих розчинних компонентів, присутніх у рані, а саме ендотоксини чи медіатори запалення, які, як правило, є катіонними або полярними за своєю природою. Продемонстрована висока сорбційна ємність, особливо для МС як модельного контамінанта, підкреслює функціональну ефективність цих матеріалів для активного менеджменту рани та акцентує на синергетичній ролі полімерної матриці, яка комплементує антисептичну дію ксероформу, сприяючи очищенню рани. Можливість адаптивної оптимізації сорбційних властивостей шляхом варіації співвідношення полімерів та умов модифікації крохмалю уможливило налаштування характеристик матеріалу для специфічних клінічних аплікацій та управління різними типами й обсягами раневого ексудату.

Висновки. У результаті проведених досліджень було розроблено та охарактеризовано композиційні матеріали ветеринарного призначення на основі модифікованого крохмалю, полівінілового спирту та ксероформу з метою створення нових антимікробних плівок-носіїв для трансдермальних терапевтичних систем. Встановлено, що всі розроблені розчини демонструють псевдопластичні властивості, що характеризуються зниженням в'язкості зі збільшенням швидкості зсуву. Показано, що хімічна модифікація крохмалю лимонною кислотою сприяє утворенню ковалентно-зшитої мережевої структури, тоді як молочна кислота виявилася менш ефективною для міжмолекулярного зшивання. Доведено, що реологічні властивості композицій можуть бути адаптовані шляхом варіювання співвідношення полімерів та умов модифікації крохмалю. Додатково, дослідження адсорбційних властивостей показало високу ефективність розроблених плівок щодо поглинання метиленового синього, що підтверджує їх потенціал для очищення раневого ложа від ексудату та інших шкідливих розчинних

компонентів. Таким чином, розроблені матеріали є перспективними для застосування у ветеринарній медицині як функціональні пов'язки, що поєднують у собі властивості контрольованого вивільнення антисептичного агента з високою сорбційною здатністю, що є критично важливим для комплексного та ефективного лікування пошкоджень шкірного покриву.

Л і т е р а т у р а

1. Галатенко Н. Л. Створення перев'язного плівкового засобу з широким спектром дії для лікування ран та опіків. Клінічна терапія. 2006. № 11–12. С. 52.
2. Іщенко О. В., Плаван В. П., Ляшок І. О., Кучинська Д. А., Ресницький І. В. Модифіковані полісахариди у фармації. KyivPharma-2017. Фармакологія та фармацевтична технологія в забезпеченні активного довголіття : зб. наук. пр. III Міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2017. С. 61–70.
3. A critical review on polymeric biomaterials for biomedical applications / C. Kalirajan et al. *Polymers*. 2021. Vol. 13, no. 17. P. 3015. URL: <https://doi.org/10.3390/polym13173015>.
4. A prospective review on the research progress of citric acid modified starch / M. Zhang et al. *Foods*. 2023. Vol. 12, no. 3. P. 458.
5. Antimicrobial and sorption properties of polymer films based on modified starch with xeroform for veterinary purposes / D. Kuchynska et al. *Technologies and Engineering*. 2025. Vol. 26, no. 2. P. 48–57.
6. Functional Hydrogels for Treatment of Chronic Wounds / I. Firlar et al. *Gels*. 2022. Vol. 8, no. 2. P. 127. URL: <https://doi.org/10.3390/gels8020127>.
7. Gilhotra R. M., Mishra D. N. Alginate-chitosan film for ocular drug delivery: Effect of surface cross-linking on film properties and characterization. *Pharmazie*. 2008. Vol. 63. P. 576–579.
8. Interactions of Cells and Biomaterials for Nerve Tissue Engineering: Polymers and Fabrication / M. E. Harley-Troxell et al. *Polymers*. 2023. Vol. 15, no. 18. P. 3685. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15183685>.
9. Khan I., Saeed K., Zekker I., Zhang B., Hendi A. H., Ahmad A., Khan I. Review on methylene blue: its properties, uses, toxicity and photodegradation. *Water*. 2022. Vol. 14, no. 2. P. 242.
10. Modified Starch in Composition with Polyvinyl Alcohol as a Basis for Development of the Polymeric Materials for Pharmaceutical Use / O. Ishchenko et al. *Starch-Stärke*. 2022. Vol. 74, no. 9–10. P. 2200062. URL: <https://doi.org/10.1002/star.202200062>.
11. Multifunctional and Smart Wound Dressings—A Review on Recent Research Advancements in Skin

- Regenerative Medicine / N. Rani Raju et al. *Pharmaceutics*. 2022. Vol. 14, no. 8. P. 1574. URL: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14081574>.
12. New mucoadhesive chitosan film for ophthalmic drug delivery of timolol maleate: in vivo evaluation / G. O. Fulgêncio et al. *Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics*. 2012. Vol. 28, no. 4. P. 350–358.
 13. Olawoye B., Jolayemi O. S., Akinyemi T. Y., Nwaogu M., Oluwajuyitan T. D., Popoola-Akinola O. O., Akanbi C. T. Modification of starch. *Starch: Advances in modifications, technologies and applications*. Springer, 2023. P. 11–54.
 14. Polymer-based biomaterials for chronic wound management: promises and challenges / M. M. Arif et al. *International Journal of Pharmaceutics*. 2021. Vol. 598. P. 120270. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120270>.
 15. Thin films as an emerging platform for drug delivery / S. Karki et al. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2016. Vol. 11, no. 5. P. 559–574. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2016.05.004>.
 16. Wagh V. D., Inamdar B., Samanta M. K. Polymers used in ocular dosage form and drug delivery systems. *Asian Journal of Pharmacy*. 2008. Vol. 2. P. 12–17.
 17. Wang S., Copeland L. Effect of acid hydrolysis on starch structure and functionality: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2015. Vol. 55, no. 8. P. 1081–1097. URL: [\[https://doi.org/10.3390/gels8020127\]](https://doi.org/10.3390/gels8020127)(<https://doi.org/10.3390/gels8020127>).
 7. Gilhotra R. M., Mishra D. N. Alginate-chitosan film for ocular drug delivery: Effect of surface cross-linking on film properties and characterization. *Pharmacy*. 2008. Vol. 63. P. 576–579.
 8. Interactions of Cells and Biomaterials for Nerve Tissue Engineering: Polymers and Fabrication / M. E. Harley-Troxell et al. *Polymers*. 2023. Vol. 15, no. 18. P. 3685. URL: [\[https://doi.org/10.3390/polym15183685\]](https://doi.org/10.3390/polym15183685)(<https://doi.org/10.3390/polym15183685>).
 9. Khan I., Saeed K., Zekker I., Zhang B., Hendi A.H., Ahmad A., Khan I. Review on methylene blue: its properties, uses, toxicity and photodegradation. *Water*. 2022. Vol. 14, no. 2. P. 242.
 10. Modified Starch in Composition with Polyvinyl Alcohol as a Basis for Development of the Polymeric Materials for Pharmaceutical Use / O. Ishchenko et al. *Starch-Stärke*. 2022. Vol. 74, no. 9–10. P. 2200062. URL: [\[https://doi.org/10.1002/star.202200062\]](https://doi.org/10.1002/star.202200062)(<https://doi.org/10.1002/star.202200062>).
 11. Multifunctional and Smart Wound Dressings—A Review on Recent Research Advances in Skin Regenerative Medicine / N. Rani Raju et al. *Pharmaceutics*. 2022. Vol. 14, no. 8. P. 1574. URL: [\[https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14081574\]](https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14081574)(<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14081574>).
 12. New mucoadhesive chitosan film for ophthalmic drug delivery of timolol maleate: in vivo evaluation / G. O. Fulgêncio et al. *Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics*. 2012. Vol. 28, no. 4. P. 350–358.
 13. Olawoye B., Jolayemi O.S., Akinyemi T.Y., Nwaogu M., Oluwajuyitan T.D., Popoola-Akinola O.O., Akanbi C.T. Modification of starch. *Starch: Advances in modifications, technologies and applications*. Springer, 2023. P. 11–54.
 14. Polymer-based biomaterials for chronic wound management: promises and challenges / M. M. Arif et al. *International Journal of Pharmaceutics*. 2021. Vol. 598. P. 120270. URL: [\[https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120270\]](https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120270)(<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120270>).
 15. Thin films as an emerging platform for drug delivery / S. Karki et al. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2016. Vol. 11, no. 5. P. 559–574. URL: [\[https://doi.org/10.1016/j.ajps.2016.05.004\]](https://doi.org/10.1016/j.ajps.2016.05.004)(<https://doi.org/10.1016/j.ajps.2016.05.004>).
 16. Wagh V. D., Inamdar B., Samanta M. K. Polymers used in ocular dosage form and drug delivery systems. *Asian Journal of Pharmacy*. 2008. Vol. 2. P. 12–17.
 17. Wang S., Copeland L. Effect of acid hydrolysis on starch structure and functionality: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2015. Vol. 55, no. 8. P. 1081–1097.

References

1. Galatenko N. L. Creation of a dressing film with a wide spectrum of action for the treatment of wounds and burns. *Clinical Therapy*. 2006. No. 11–12. P. 52.
2. Ishchenko O. V., Plavan V. P., Lyashok I. O., Kuchynska D. A., Resnytsky I. V. Modified polysaccharides in pharmacy. *KyivPharma-2017. Pharmacology and pharmaceutical technology in ensuring active longevity: collection of scientific proceedings of the III International Scientific-Practical Conference*. Kyiv, 2017. P. 61–70.
3. A critical review on polymeric biomaterials for biomedical applications / C. Kalirajan et al. *Polymers*. 2021. Vol. 13, no. 17. P. 3015. URL: [\[https://doi.org/10.3390/polym13173015\]](https://doi.org/10.3390/polym13173015)(<https://doi.org/10.3390/polym13173015>).
4. A prospective review on the research progress of citric acid modified starch / M. Zhang et al. *Foods*. 2023. Vol. 12, no. 3. P. 458.
5. Antimicrobial and sorption properties of polymer films based on modified starch with xeroform for veterinary purposes / D. Kuchynska et al. *Technologies and Engineering*. 2025. Vol. 26, no. 2. P. 48–57.
6. Functional Hydrogels for Treatment of Chronic Wounds / I. Firlar et al. *Gels*. 2022. Vol. 8, no. 2. P. 127. URL: [\[https://doi.org/10.3390/gels8020127\]](https://doi.org/10.3390/gels8020127)(<https://doi.org/10.3390/gels8020127>).

Ishchenko O.V., Strashnyi V.V., Kuchynska D.A., Kharytonenko G.I., Resnytskyi I.V., Kuchynska M.A. Composite material for veterinary purposes based on modified starch

The article considers the development of veterinary composite materials based on modified starch with the aim of creating new antimicrobial film carriers for transdermal therapeutic systems. The research methodology involved the chemical modification of potato starch with citric and lactic acids under various conditions, followed by its combination with polyvinyl alcohol and xeroform as an active pharmaceutical ingredient. The rheological properties of the resulting compositions were studied by rotational viscometry. It was established that all developed solutions exhibit pseudoplastic properties ($n < 1$) and are characterized by a decrease in viscosity with an increasing shear rate. It was proven that citric acid, due to its multifunctionality, promotes the formation of a covalently cross-linked network structure, which leads to an increase in the viscosity of the solutions. In contrast, lactic acid, having only one carboxyl group, proved to be less effective for intermolecular cross-linking and in some cases catalyzed the partial hydrolysis of starch. The results confirm that the viscosity of the compositions significantly increases with an increase in polyvinyl alcohol content and upon the addition of xeroform, especially for mixtures based on lactic acid-modified starch. Additionally, the kinetic and capacitive characteristics of the adsorption of methylene blue (MB) as a model contaminant were studied. It was found that films with a high content of modified starch, in particular those modified with lactic acid, demonstrate high sorption capacity. This indicates the promising use of the developed materials not only for the retention of medicinal substances, but also for the effective cleaning of the wound bed from exudate and

toxic compounds, which is a key factor in accelerated wound healing. The obtained data demonstrate the prospects of using the developed materials for creating effective agents for treating skin damage in veterinary medicine.

Keywords: *modified polysaccharides, active pharmaceutical ingredient, composite material, polyvinyl alcohol, starch, rheology, xeroform.*

Іщенко Олена Володимирівна – д.т.н., доцент, професор кафедри промислової фармації, Київський національний університет технологій та дизайну, e.ishchenko5@gmail.com

Страшний Владислав Володимирович – д.фарм.н., професор, завідувач кафедри промислової фармації, Київський національний університет технологій та дизайну, strashniy.vv@knuutd.edu.ua

Кучинська Дар'я Андріївна – доктор філософії, завідувачка лабораторії кафедри промислової фармації, Київський національний університет технологій та дизайну, dkuchinska@gmail.com

Ресницький Ілля Вячеславович – к.т.н., асистент кафедри промислової фармації, Київський національний університет технологій та дизайну, ilya9res@gmail.com

Харитоненко Ганна Ігорівна – к.б.н., доцент, доцент кафедри промислової фармації, Київський національний університет технологій та дизайну, kharitonenko.gi@knuutd.edu.ua

Кучинська Марія Андріївна – здобувачка вищої освіти кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження, Київський національний університет технологій та дизайну, mariammmmt@gmail.com.

Стаття подана 22.09.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-66-72>

УДК 629.4.027.31-272.82

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДЕФОРМУВАННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ РЕСОРИ В УМОВАХ АВАРІЙНОЇ РОБОТИ

Кузишин А.Я., Ковальчук В.В.

STUDY OF THE PECULIARITIES OF DEFORMATION OF A PNEUMATIC SPRING UNDER CONDITIONS OF ITS EMERGENCY OPERATION

Kuzyshyn A. Ya., Kovalchuk V.V.

Безпека руху є ключовою задачею експлуатації рухомого складу. Враховуючи тенденцію до збільшення швидкостей руху сучасний рухомий склад має конструктивні зміни в механічній частині, а саме застосування пневматичної системи ресорного підвішування. Система має характеристики жорсткості та демпфування. Однак, в процесі експлуатації можливі випадки несправності пневматичної системи (відсутність стисненого повітря), що передбачатиме передачу навантаження кузова на візки через аварійні пружини, які мають значно більшу жорсткість у порівнянні із пневматичною ресорою при її справній роботі. Все це призведе до збільшення сил у в'язях між конструктивними елементами рухомого складу та сил взаємодії колісної пари з рейковою колією, а в подальшому до обмеження швидкостей руху. Таким чином метою статті є експериментальне дослідження особливостей деформування пневматичної ресори в умовах її аварійної роботи та визначення величини вертикального деформування аварійної пружини. Для досягнення цієї мети було розроблено методику експериментальних досліджень вертикального деформування пневматичної ресори в умовах аварійної роботи, яка базується на застосуванні потенціометричного датчика лінійних переміщень, аналого-цифрового перетворювача та ноутбука зі спеціалізованим програмним забезпеченням. У результаті проведених досліджень встановлено закономірності вертикального деформування пневматичної ресори під впливом статичного навантаження від маси кузова під час його осідання внаслідок зниження тиску повітря в системі. Аналіз отриманих закономірностей дозволив встановити чотири основні етапи роботи пневматичної ресори в аварійному режимі: деформування гумокордної

оболонки, контакт кузова з аварійною пружиною, подальше деформування аварійної пружини під навантаженням і завершення її деформації. У ході експерименту зафіксовано, що максимальна величина вертикального деформування аварійної пружини пневматичної ресори досягає 7,18 мм. Наукова новизна отриманих результатів полягає у експериментальному встановленні закономірностей деформування пневматичної ресори в умовах її аварійної роботи та визначенні величини вертикального деформування аварійної пружини. Це дозволить більш точно моделювати роботу пневматичної ресори та в подальшому аналізувати динамічні показники безпеки руху рухомого складу в умовах аварійного режиму роботи пневматичної ресори.

Ключові слова: швидкісний рухомий склад, пневматична ресора, аварійна пружина, деформування, вертикальне навантаження, внутрішній тиск.

Вступ. Збільшення пропускної та провізної здатності залізниці є ключовою задачею її розвитку, що є можливим за рахунок збільшення швидкостей руху. Проте збільшення швидкостей руху передбачає необхідність застосування конструктивних рішень у механічній частині рухомого складу. В першу чергу слід відзначити застосування між кузовом та візками пневматичної системи ресорного підвішування, яка складається із пневматичної ресори (рис. 1), додаткового резервуару, з'єднувального трубопроводу та ін. елементів. Пневматична система дозволяє не тільки підтримувати на одному рівні висоту кузова

(перевага над вітчизняними системами підвішування), але і змінювати жорсткість пневматичної ресори у залежності від завантаженості кузова.

Пневматична ресора складається із кріпильних болтів ущільнювального кільця 1, зажиму плити ковзання 2, болтів ковзаючої плити 3, кріпильної плити 4, ущільнювального кільця 5, ковзаючої плити 6, гумокордної оболонки 7, нижньої плити 8, болтів нижньої плити 9 та аварійної пружини 10.

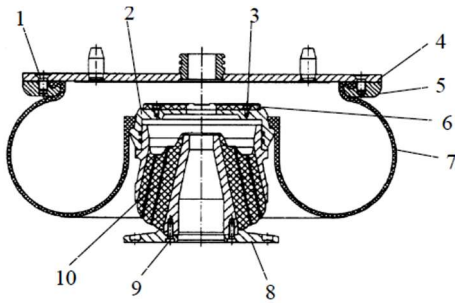


Рис. 1. Пневматична ресора рухомого складу

У залежності від жорсткості пневматичної ресори залежатиме рівень динамічних сил у в'язях механічної частини рухомого складу та динамічні показники безпеки руху [1–2].

Дослідження динамічної поведінки пневматичної ресори становить значний науковий інтерес. Водночас варто зазначити, що переважна більшість робіт у цій галузі мають теоретичну спрямованість, тоді як експериментальним дослідженням приділено недостатньо уваги.

Залежно від типу розв'язуваних рівнянь моделі пневматичних ресор класифікуються на три основні групи [3]: механічні [4–6], термодинамічні [7] та скінченно-елементні [8–9]. Основною характеристикою цих моделей є вертикальна жорсткість пневматичної ресори.

Далі проведемо аналіз праць у яких є експериментальні дослідження вертикальної жорсткості пневматичної ресори, що проведені в лабораторних умовах. У роботі [10] експериментальним шляхом було досліджено роботу пневматичної системи ресорного підвішування в частотному діапазоні від 0 до 400 Гц. Результати показали характерні діапазони частот, де спостерігаються резонансні явища: низькочастотний (до 30 Гц), який пов'язаний із рухом повітря між пневматичною ресорою та додатковим резервуаром; проміжний (від 30 Гц до 150 Гц) та високочастотний (більше 150 Гц) – зумовлені структурною динамікою пневматичної ресори.

У роботі [11] авторами досліджено деформації гумокордної оболонки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках при зміні внутрішнього тиску в ресорі. Встановлено, що деформація оболонки у горизонтальній площині зростає більш інтенсивно порівняно з вертикальною при збільшенні внутрішнього тиску. Також авторами отримано поліноміальні залежності, які описують деформаційні характеристики гумокордної оболонки пневматичної ресори.

У роботі [12] за допомогою випробувального стенда визначено вертикальну динамічну жорсткість пневматичної системи ресорного підвішування при різних експлуатаційних умовах. Встановлено, що пневматична система ресорного підвішування проявляє нелінійність у діапазоні середніх частот (від 6 до 14 Гц). При зменшенні або збільшенні частоти жорсткість системи стабілізується на фіксованому рівні, що відповідає статичній та динамічній жорсткості пневматичної ресори.

У роботі [13] авторами застосовано чотири експериментальні методи для оцінки статичної та квазістатичної вертикальної жорсткості пневматичної ресори. Показано, що отримані залежності жорсткість–навантаження мають нелінійний характер. Зазначено, що жорсткість гумокордної оболонки відіграє значну роль при невеликих навантаженнях, тоді як її вплив суттєво зменшується при високих навантаженнях.

У дослідженні [14] наведено результати експериментальних випробувань, які були проведені відповідно до вимог стандарту EN 13597, з метою уточнення параметрів пневматичної ресори. Автори застосували вертикальне навантаження величиною 109,8 кН з амплітудою коливань ± 10 мм у частотному діапазоні 0,5–10 Гц. Отримані результати є важливими для уточнення динамічних характеристик підвіски в умовах реальної експлуатації.

У роботі [15] виконано експериментальне дослідження динамічної поведінки пневматичної системи ресорного підвішування за різних конфігурацій з'єднання між пневморесорою та додатковим резервуаром. Під час випробувань варіювались параметри амплітуди збурення та частоти коливань. Результати показали, що для ефективного демпфування низькочастотних збурень найкращі характеристики забезпечує конфігурація типу «bellow–orifice–pipe–

reservoir». У той час як для високочастотних збурень більш ефективною виявилася схема «bellow–orifice–reservoir».

У дослідженні [16] для моделювання динамічної поведінки пневматичної системи підвищення за різних конфігурацій і режимів роботи було розроблено випробувальний стенд. Основну увагу зосереджено на дослідженні вертикального напрямку, з огляду на його ключовий вплив на комфорт пасажирів, безпеку руху та динамічну взаємодію колісних пар із рейковою колією. У ході експериментальних досліджень виявлено суттєву залежність характеристик системи від амплітуди збурень, частоти впливу та попереднього навантаження.

На підставі аналізу праць [10–16] зроблено висновок, що динамічна поведінка пневматичних ресор досліджується за допомогою різноманітних експериментальних методик, що дозволяє детально вивчати вплив окремих параметрів системи.

Однак у процесі експлуатації рухомого складу можливі випадки несправності пневматичної системи ресорного підвищення, що передбачатиме відсутність стисненого повітря. У такому випадку навантаження, яке передаватиметься від кузова на візки буде передаватись через аварійну пружину. Слід зазначити, що жорсткість аварійної пружини є значно більшою за жорсткість ресори при нормальній роботі пневматичної системи, що у свою чергу змінюватиме рівень динамічних сил та впливатиме на стан безпеки руху.

Отже, проаналізувавши вищенаведені наукові роботи, слід відзначити, що на даний час проведено значну кількість досліджень по визначенню вертикальної жорсткості ресори при нормальній роботі пневматичної системи ресорного підвищення. Однак, не вирішеним завданням залишається дослідження особливостей деформування пневматичної ресори в умовах її аварійної роботи.

Метою роботи є експериментальне дослідження особливостей деформування пневматичної ресори в умовах її аварійної роботи та визначення величини вертикального деформування аварійної пружини.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

1. Розробити методику експериментальних досліджень деформування пневматичної ресори в умовах її аварійних роботи.

2. Побудувати залежності деформування ресори при спуску повітря із пневматичної системи ресорного підвищення та встановити

величину вертикального деформування аварійної пружини.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження особливостей деформування пневматичної ресори в умовах її аварійної роботи під впливом статичного навантаження від маси кузова було проведено експериментальні вимірювання. У випробуваннях застосовувався потенціометричний датчик лінійного переміщення, аналого-цифровий перетворювач та ноутбук зі спеціалізованим програмним забезпеченням для фіксації даних. Експеримент було проведено для дизель-поїзда ДПКр-3 на території моторвагонного депо Львівської залізниці (рис. 2).



Рис. 2. Схема та інформаційно-вимірювальне забезпечення для проведення записів деформування пневматичної ресори рухомого складу

Особливості деформування ресори рухомого складу досліджувалися у двох режимах роботи. У першому випадку здійснювався одночасний спуск повітря з двох ресор, встановлених на першому візку. У другому – проводилося нагнітання повітря в ресори до тиску 7 атм.

Деформації пневматичної ресори реєструвалися високочастотним потенціометричним датчиком лінійних переміщень із частотою дискретизації 1000 Гц. Отримані сигнали оцифровувалися за допомогою аналого-цифрового перетворювача та зберігалися на комп'ютері для подальшої обробки й аналізу.

У результаті спуску повітря були зафіксовані закономірності деформування пневматичної ресори під дією ваги кузова рухомого складу під час його осідання (рис. 3).

Під час закачування повітря зафіксовано зворотний процес, а саме підйом кузова та відповідне деформування ресори у протилежному напрямку під дією того ж навантаження (рис. 4).

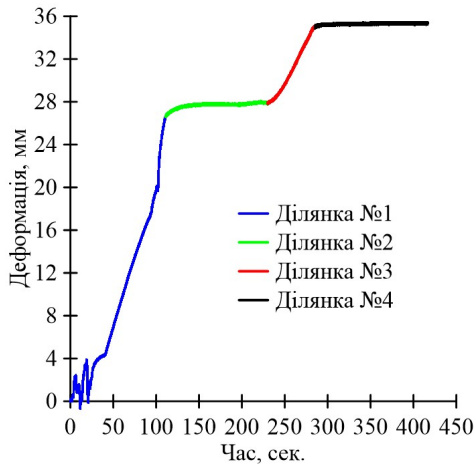


Рис. 3. Деформування ресори під дією ваги кузова рухомого складу під час його осідання внаслідок спуску повітря

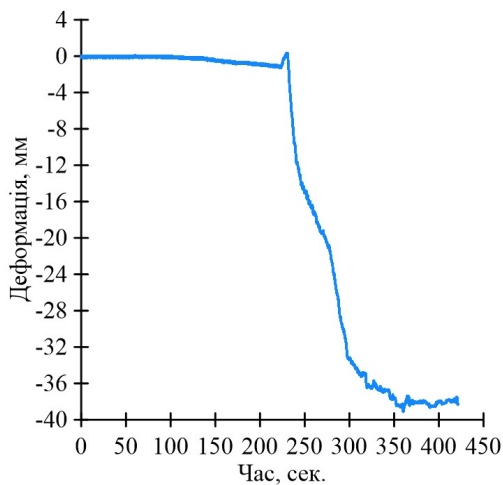


Рис. 4. Деформування ресори при закачуванні повітря до 7 атм. під дію ваги кузова рухомого складу

Проведені експериментальні дослідження дали змогу визначити величини деформацій пневматичної ресори під час осідання кузова на аварійну пружину, що є важливим при оцінюванні її поведінки в умовах аварійного режиму експлуатації.

Аналіз залежності деформування пневматичної ресори під дією ваги кузова рухомого складу під час спуску повітря (рис. 3) свідчить про наявність чітко виражених етапів:

– на ділянці №1 спостерігається деформування гумокордної оболонки ресори внаслідок зниження тиску повітря. Величина

деформації на цій ділянці становила 26,7 мм. Варто зазначити, що на момент початку спуску повітря не було точної інформації щодо поточного тиску в системі, а також не було підтверджено, чи відповідає зазор між верхньою пластиною та аварійною пружиною номінальному значенню.

– на ділянці №2 фіксується момент, коли кузов рухомого складу опускається на аварійну пружину. Як бачимо різкого просідання кузова не відбувається, що пов'язано із залишковим тиском в пневматичній ресорі.

– на ділянці №3 (після повного виходу повітря) відбувається деформування аварійної пружини під навантаженням від маси кузова. Величина деформації аварійної пружини склала 7,18 мм.

– на ділянці №4 деформування аварійної пружини припиняється, що свідчить про досягнення стану статичної рівноваги системи.

При закачуванні повітря в пневматичну ресору була зафіксована вертикальна деформація розміром 38,6 мм. Така величина деформування відповідає очікуванім технічним характеристикам ресори та свідчить про правильність проведених вимірювань і коректність експериментальної установки. Отримані дані підтверджують адекватність методики вимірювання та дозволяють використовувати їх для подальшого аналізу поведінки ресори під навантаженням.

Отже, отримані експериментальні дані дозволяють сформулювати комплексне уявлення про механізми деформування пневматичної ресори, включаючи поведінку аварійної пружини. Це створює основу для подальшого моделювання динамічних процесів рухомого складу в аварійних режимах експлуатації та сприяє розробці більш ефективних методів прогнозування його надійності та безпеки.

Висновки. Розроблено методику експериментальних досліджень вертикального деформування пневматичної ресори в умовах аварійної роботи, яка базується на застосуванні потенціометричного датчика лінійних переміщень, аналого-цифрового перетворювача та ноутбука зі спеціалізованим програмним забезпеченням.

Встановлено закономірності вертикального деформування пневматичної ресори під дією ваги кузова при осіданні, викликаному спуском повітря.

Виділено чотири ключові стадії роботи ресори: деформування гумокордної оболонки, осідання кузова на аварійну пружину,

деформування аварійної пружини під навантаженням та завершення її деформування. Встановлено, що величина вертикального деформування аварійної пружини пневматичної ресори становить 7,18 мм.

Отримані результати сприяють подальшому їх використанню при встановленні вертикальної жорсткості аварійної пружини та дослідженню динамічних показників безпеки руху рухомого складу в умовах аварійної роботи пневматичної ресори.

Література

1. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension / A. Kuzyshyn et al. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 234. P. 05003. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823405003>.
2. Кузишин А. Я., Ковальчук В. В., Соболевська Ю. Г. Встановлення коефіцієнтів вертикальної динаміки другого ступеня ресорного підвішування швидкісного електропоїзда ЕКр-1 «Тарпан». *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30, № 1. С. 29–36. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i1.326788>.
3. Світовий досвід створення математичних моделей пневматичної ресори: переваги та недоліки / А. Я. Кузишин та ін. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 4(94). С. 25–42. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2021/245974>.
4. Wheel–rail dynamic of DMU IC4 car for DSB: modeling of the secondary air springs and effects on calculation results / C. Pellegrini et al. *Vehicle System Dynamics*. 2006. Vol. 44, sup1. P. 433–442. URL: <https://doi.org/10.1080/00423110600872960>.
5. Aizpun M., Vinolas J., Alonso A. Using the stationary tests of the acceptance process of a rail vehicle to identify the vehicle model parameters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013. Vol. 228, no. 4. P. 408–421. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409713478592>.
6. Berg M. A Three–Dimensional Airspring Model with Friction and Orifice Damping. *Vehicle System Dynamics*. 1999. Vol. 33, sup1. P. 528–539. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109>.
7. Docquier N., Fiset P., Jeanmart H. Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics*. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 505–524. URL: <https://doi.org/10.1080/00423110601050848>.
8. Xu L. Mathematical Modeling and Characteristic Analysis of the Vertical Stiffness for Railway Vehicle Air Spring System. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/2036563>.
9. Berry D. T., Yang H. T. Y. Formulation and experimental verification of a pneumatic finite element. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1996. Vol. 39, no. 7. P. 1097–1114.
10. Analysis and modelling of the dynamic stiffness up to 400 Hz of an air spring with a pipeline connected to a reservoir / I. Mendia-Garcia et al. *Journal of Sound and Vibration*. 2023. P. 117740. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117740>.
11. Кузишин А. Я., Ковальчук В. В. Експериментальні дослідження закономірностей деформування гумокордної оболонки пневматичної ресори швидкісного рухомого складу. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 2(106). С. 53–63. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2024/306143>.
12. Air suspension characterisation and effectiveness of a variable area orifice / A. Alonso et al. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48, sup1. P. 271–286. URL: <https://doi.org/10.1080/00423111003731258>.
13. Li X., Li T. Research on vertical stiffness of belted air springs. *Vehicle System Dynamics*. 2013. Vol. 51, no. 11. P. 1655–1673. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984>.
14. Sayyaadi H., Shokouhi N. Effects of air reservoir volume and connecting pipes' length and diameter on the air spring behavior in rail–vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 34, No. 5. P. 499–508. DOI: <https://doi.org/10.22099/ijstm.2010.916>.
15. Study on Different Connection Types of Air Spring / H. X. Gao et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 423–426. P. 2026–2034. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.423-426.2026>.
16. Mazzola L., Berg M. Secondary suspension of railway vehicles - air spring modelling: Performance and critical issues. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2012. Vol. 228, no. 3. P. 225–241. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409712470641>.

References

1. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension / A. Kuzyshyn et al. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 234. P. 05003. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823405003>.
2. Kuzyshyn A. Ya., Kovalchuk V. V., Sobolevska Yu. H. Vstanovlennia koefitsientiv vertykalnoi dynamiky druhoho stupenia resornoho pidvishuvannia shvydkisnoho elektrovozda EKr-1 «Tarpan». *Informatsiino-keruiuchi systemy na*

- zaliznychnomu transporti. 2025. Т. 30, № 1. S. 29–36. URL: <https://doi.org/10.18664/iksz.v30i1.326788>.
3. Svitovyi dosvid stvorennia matematychnykh modelei pnevmatychnoi resory: perevahy ta nedoliky / A. Ya. Kuzyshyn ta in. Nauka ta prohres transportu. 2021. № 4(94). S. 25–42. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2021/245974>.
 4. Wheel–rail dynamic of DMU IC4 car for DSB: modeling of the secondary air springs and effects on calculation results / C. Pellegrini et al. *Vehicle System Dynamics*. 2006. Vol. 44, sup1. P. 433–442. URL: <https://doi.org/10.1080/00423110600872960>.
 5. Aizpun M., Vinolas J., Alonso A. Using the stationary tests of the acceptance process of a rail vehicle to identify the vehicle model parameters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013. Vol. 228, no. 4. P. 408–421. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409713478592>.
 6. Berg M. A Three-Dimensional Airspring Model with Friction and Orifice Damping. *Vehicle System Dynamics*. 1999. Vol. 33, sup1. P. 528–539. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063109>.
 7. Docquier N., Fiset P., Jeanmart H. Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions. *Vehicle System Dynamics*. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 505–524. URL: <https://doi.org/10.1080/00423110601050848>.
 8. Xu L. Mathematical Modeling and Characteristic Analysis of the Vertical Stiffness for Railway Vehicle Air Spring System. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/2036563>.
 9. Berry D. T., Yang H. T. Y. Formulation and experimental verification of a pneumatic finite element. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1996. Vol. 39, no. 7. P. 1097–1114.
 10. Analysis and modelling of the dynamic stiffness up to 400 Hz of an air spring with a pipeline connected to a reservoir / I. Mendia-Garcia et al. *Journal of Sound and Vibration*. 2023. P. 117740. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117740>.
 11. Kuzyshyn A. Ya., Kovalchuk V. V. Eksperymentalni doslidzhennia zakonmirnostei deformuvannia humokordnoi obolonky pnevmatychnoi resory shvydkisnoho rukhomoho skladu. Nauka ta prohres transportu. 2024. № 2(106). S. 53–63. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2024/306143>.
 12. Air suspension characterisation and effectiveness of a variable area orifice / A. Alonso et al. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48, sup1. P. 271–286. URL: <https://doi.org/10.1080/00423111003731258>.
 13. Li X., Li T. Research on vertical stiffness of belted air springs. *Vehicle System Dynamics*. 2013. Vol. 51, no. 11. P. 1655–1673. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.819984>.
 14. Sayyaadi H., Shokouhi N. Effects of air reservoir volume and connecting pipes' length and diameter on the air spring behavior in rail–vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 34, No. 5. P. 499–508. DOI: <https://doi.org/10.22099/ijstm.2010.916>.
 15. Study on Different Connection Types of Air Spring / H. X. Gao et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 423–426. P. 2026–2034. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.423-426.2026>.
 16. Mazzola L., Berg M. Secondary suspension of railway vehicles - air spring modelling: Performance and critical issues. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2012. Vol. 228, no. 3. P. 225–241. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409712470641>.
- Kuzyshyn, A. Ya., Kovalchuk, V. V. Study of the peculiarities of deformation of a pneumatic spring under conditions of its emergency operation**
- Traffic safety is a key aspect of rolling stock operation. Given the trend toward increasing speeds, modern rolling stock features structural changes in its mechanical systems, particularly the implementation of pneumatic suspension systems. This system possesses specific stiffness and damping characteristics. However, during operation, malfunctions of the pneumatic system may occur (such as the absence of compressed air), which leads to the transfer of the vehicle body's load to the bogies via emergency springs. These springs exhibit significantly higher stiffness compared to a functioning pneumatic spring. This situation results in increased forces in the connections between the structural elements of the rolling stock and greater interaction forces between the wheelset and the rail track, ultimately leading to speed restrictions. The aim of this study is to experimentally investigate the deformation behavior of the pneumatic spring under emergency operating conditions and to determine the magnitude of the vertical deformation of the emergency spring. To achieve this goal, a methodology for experimental research was developed. It focuses on studying the vertical deformation of the pneumatic spring in emergency mode and is based on the use of a potentiometric linear displacement sensor, an analog-to-digital converter, and a laptop with specialized software. As a result, regularities in the vertical deformation of the pneumatic spring under the influence of static load from the vehicle body mass during pressure loss in the system were identified. Analysis of these patterns allowed for the identification of four main stages of pneumatic spring*

operation in emergency mode: deformation of the rubber-cord casing, contact of the vehicle body with the emergency spring, further deformation of the emergency spring under load, and completion of its deformation. During the experiment, it was recorded that the maximum vertical deformation of the emergency spring in the pneumatic suspension system reached 7.18 mm. The scientific novelty of the obtained results lies in the experimental identification of the deformation behavior of the pneumatic spring under emergency conditions and the determination of the emergency spring's vertical deformation value. This will enable more accurate modeling of pneumatic suspension performance and support further analysis of the dynamic safety indicators of rolling stock under emergency pneumatic system operation.

Keywords: *pneumatic spring, emergency spring, deformation, vertical load, internal pressure*

Кузишин Андрій Ярославович – доктор філософії (PhD), доцент кафедри «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua

Ковальчук Віталій Володимирович – д.т.н., професор, професор кафедри «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, kovalchuk.diit@gmail.com

Стаття подана 18.09.2025.

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 8 (294) 2025**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 25.10.2025 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 8,6. Обл.-вид. арк. 10,2.
Наклад 50 прим. Вид. № 3426.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: вул. Іоанна Павла II, 17,
м. Київ, 01042, Україна
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com