

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний
університет

НАУКОВІ НОТАТКИ

Міжвузівський збірник наукових праць

(Видання відповідає кластеру «Механічна
інженерія та машинобудування»)

Випуск 85

Луцьк 2026

Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» | «Naukovi Notatki» є фаховим виданням України, категорії Б.

Збірник зареєстрований Державною реєстраційною службою України (свідоцтво серія KB, № 15901-4373ПР від 13.11.2019 р.).

Збірнику присвоєно міжнародний стандартний серійний номер: **ISSN: 2415-3966.**

Рік заснування: 1993

«Наукові нотатки» – це фахове рецензоване видання категорії Б з відкритим доступом, яке публікує оглядові статті та результати оригінальних фундаментальних і прикладних наукових досліджень за напрямом «Механічна інженерія та машинобудування». Відповідно до Наказу Міністерства освіти і науки України "Про внесення змін до Порядку формування Переліку наукових фахових видань України" №56 від 19.01. 2026 р. видання відповідає кластеру «Механічна інженерія та машинобудування», а наукові праці публікуються за наступними спеціальностями:

- G8 Матеріалознавство;
- G9 Прикладна механіка;
- G11 Машинобудування (за спеціалізаціями).

Періодичність – 4 рази на рік

Мова видання: **українська, англійська**

Засновник: **Луцький національний технічний університет, Україна, Волинська обл., 43018 Луцьк. вул. Львівська 75.**

Редакція: тел. (0332) 26-25-19, E-mail: naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua;
https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/uk

Видання зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення як суб'єкт у сфері друкованих медіа (рішення № 40 від 11.01.2024р., **ідентифікатор медіа R30-02455**).

Склад редакції затверджено Вченою радою Луцького національного технічного університету (протокол №10 від 26.03. 2026 р.).

Головний редактор: Рудь Віктор Дмитрович, доктор технічних наук, професор

Мельничук Микола Дмитрович, кандидат технічних наук, доцент

Заступники головного редактора: Федосов Сергій Анатолійович, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики та вищої математики

Шимчук Сергій Петрович, кандидат технічних наук, доцент

Помічники головного редактора: Клименко Олександр Дмитрович, кандидат технічних наук, доцент

Мартинюк Віктор Леонідович, кандидат технічних наук, доцент

Мисковець Сергій Васильович, кандидат технічних наук, доцент

РЕДКОЛЕГІЯ

Рудь Віктор Дмитрович, доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0001-5025-9510](https://orcid.org/0000-0001-5025-9510). **Scopus:** [55963472900](https://scopus.com/authorid/55963472900).

Шимчук Сергій Петрович, PhD, доцент, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0002-1293-560X](https://orcid.org/0000-0002-1293-560X). **Scopus:** [57207860498](https://scopus.com/authorid/57207860498).

Мельничук Микола Дмитрович, PhD, доцент, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0001-6813-250X](https://orcid.org/0000-0001-6813-250X). **Scopus:** [57202913523](https://scopus.com/authorid/57202913523).

Федосов Сергій Анатолійович, доктор фізико-математичних наук, професор, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0003-3457-8911](https://orcid.org/0000-0003-3457-8911). **Scopus:** [7005670405](https://scopus.com/authorid/7005670405).

Зайчук Наталія Петрівна, PhD, доцент, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0001-6258-4820](https://orcid.org/0000-0001-6258-4820). **Scopus:** [57209242947](https://scopus.com/authorid/57209242947).

Єфременко Василь Георгійович, доктор технічних наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна. **ORCID:** [0000-0002-4537-6939](https://orcid.org/0000-0002-4537-6939). **Scopus:** [7005748111](https://scopus.com/authorid/7005748111).

Садова Оксана Леонідівна, PhD, доцент, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0002-6152-5447](https://orcid.org/0000-0002-6152-5447). **Scopus:** [56324720700](https://scopus.com/authorid/56324720700).

Імбірович Наталія Юріївна, доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0001-8276-6349](https://orcid.org/0000-0001-8276-6349). **Scopus:** [57223183682](https://scopus.com/authorid/57223183682).

Налобіна Олена Олександрівна, доктор технічних наук, професор, Національний університет водного господарства та природокористування, Україна. **ORCID:** [0000-0003-1661-7331](https://orcid.org/0000-0003-1661-7331). **Scopus:** [56830570100](https://scopus.com/authorid/56830570100).

Заболотний Олег Васильович, PhD, доцент, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0002-9169-9173](https://orcid.org/0000-0002-9169-9173). **Scopus:** [56520138000](https://scopus.com/authorid/56520138000).

Кашицький Віталій Павлович, PhD, професор, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0003-2346-912X](https://orcid.org/0000-0003-2346-912X). **Scopus:** [57194007438](https://scopus.com/authorid/57194007438).

Мікуліч Олена Аркадіївна, доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0003-4522-596X](https://orcid.org/0000-0003-4522-596X). **Scopus:** [57112445700](https://scopus.com/authorid/57112445700).

Никируй Любомир Іванович, кандидат фізико-математичних наук, професор, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, Україна. **ORCID:** [0000-0002-3754-0348](https://orcid.org/0000-0002-3754-0348). **Scopus:** [56009792600](https://scopus.com/authorid/56009792600).

Ткачук Валентина Віталіївна, доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0001-5793-5227](https://orcid.org/0000-0001-5793-5227). **Scopus:** [55555980000](https://scopus.com/authorid/55555980000).

Луцьков Сергій Валентинович, доктор фізико-математичних наук, професор, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0003-0737-8703](https://orcid.org/0000-0003-0737-8703). **Scopus:** [35756334500](https://scopus.com/authorid/35756334500).

Самчук Людмила Михайлівна, PhD, доцент, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0003-2516-045X](https://orcid.org/0000-0003-2516-045X). **Scopus:** [57190969673](https://scopus.com/authorid/57190969673).

Ярошевич Микола Павлович, доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0002-2436-5608](https://orcid.org/0000-0002-2436-5608). **Scopus:** [55302518900](https://scopus.com/authorid/55302518900).

Толстушко Наталія Олександрівна, PhD, доцент, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0001-8811-7868](https://orcid.org/0000-0001-8811-7868). **Scopus:** [57194657984](https://scopus.com/authorid/57194657984).

Пальчевський Богдан Олексійович, доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0002-4000-4992](https://orcid.org/0000-0002-4000-4992). **Scopus:** [57191729424](https://scopus.com/authorid/57191729424).

Баглюк Геннадій Анатолійович, доктор технічних наук, професор, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича, Україна. **ORCID:** [0000-0003-4840-3346](https://orcid.org/0000-0003-4840-3346). **Scopus:** [7003663169](https://scopus.com/authorid/7003663169).

Korniejeko Kinga, PhD, associate professor, Cracow University of Technology, Poland. **ORCID:** [0000-0002-8265-3982](https://orcid.org/0000-0002-8265-3982). **Scopus:** [57190986563](https://scopus.com/authorid/57190986563).

Grabowska Karolina, PhD, associate professor, Jan Dlugosz University in Czestochowa, Poland. **ORCID:** [0000-0002-8323-8094](https://orcid.org/0000-0002-8323-8094). **Scopus:** [57197709649](https://scopus.com/authorid/57197709649).

Уманський Олександр Павлович, доктор технічних наук, професор, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича, Україна. **ORCID:** [0000-0003-3629-7224](https://orcid.org/0000-0003-3629-7224). **Scopus:** [6602186355](https://scopus.com/authorid/6602186355).

Мікосянчик Оксана Олександрівна, доктор технічних наук, професор, Державний університет “Київський авіаційний”, Україна. **ORCID:** [0000-0002-2438-1333](https://orcid.org/0000-0002-2438-1333). **Scopus:** [10041907700](https://scopus.com/authorid/10041907700).

Сизоненко Ольга Миколаївна, доктор технічних наук, професор, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук

України,

Україна.

ORCID: [0000-0002-8449-2481](https://orcid.org/0000-0002-8449-2481). **Scopus:** [6506656939](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=6506656939).

Бейгельзімер Яків Юхимович, доктор технічних наук, професор, Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України, Україна.

ORCID: [0000-0002-1321-8565](https://orcid.org/0000-0002-1321-8565). **Scopus:** [6603568653](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=6603568653).

Веселовська Наталія Ростиславівна, доктор технічних наук, професор, Дон НУ імені Василя Стуса, Україна. **ORCID:** [0000-0001-9399-6721](https://orcid.org/0000-0001-9399-6721). **Scopus:** [57193455338](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=57193455338), [57901533300](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=57901533300).

Barbhuiya Salim, PhD, University of East London, United Kingdom. **ORCID:** [0000-0002-4325-281X](https://orcid.org/0000-0002-4325-281X). **Scopus:** [14022256100](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=14022256100).

Згалат-Лозинський Остап Броніславович, доктор технічних наук, професор, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича, Україна.

ORCID: [0000-0002-7013-5010](https://orcid.org/0000-0002-7013-5010). **Scopus:** [8939997000](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=8939997000).

Szczot Jacek, PhD, associate professor, Lubelska Szkoła Wyższa, Poland. **ORCID:** [0000-0002-5313-5246](https://orcid.org/0000-0002-5313-5246). **Scopus:** [57226139947](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=57226139947).

Штерн Михайло Борисович, доктор технічних наук, професор, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича, Україна.

ORCID: [0000-0002-7757-5721](https://orcid.org/0000-0002-7757-5721). **Scopus:** [7005771180](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=7005771180).

Halfa Hossam, PhD, associate professor, Central Metallurgical Research & Development Institute, Cairo, Egypt. **ORCID:** [0000-0002-5063-5026](https://orcid.org/0000-0002-5063-5026). **Scopus:** [15765173200](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=15765173200).

Falat Ladislav, PhD, associate professor, Institute of Materials Research Slovak, Academy of Science, Slovakia. **ORCID:** [0000-0001-6571-511X](https://orcid.org/0000-0001-6571-511X). **Scopus:** [25228483000](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=25228483000).

Juozas Padgurskas, Doctor of Technical Sciences, professor, Vytautas Magnus University, Lithuania. **ORCID:** [0000-0003-1275-9105](https://orcid.org/0000-0003-1275-9105). **Scopus:** [12545481300](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=12545481300).

Грабар Іван Григорович, доктор технічних наук, професор, Поліський національний університет, Україна. **ORCID:** [0000-0002-7193-6960](https://orcid.org/0000-0002-7193-6960). **Scopus:** [57192963535](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=57192963535).

Biswas Tuser Tirtha, PhD, University of Boras, Sweden. **ORCID:** [0000-0003-2412-9004](https://orcid.org/0000-0003-2412-9004). **Scopus:** [57200757791](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=57200757791).

Arras Peter, PhD, KU Leuven, Belgium. **ORCID:** [0000-0002-9625-9054](https://orcid.org/0000-0002-9625-9054). **Scopus:** [54395094700](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=54395094700).

Campean Emilia. Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical University of Cluj-Napoca, România. **ORCID:** [0000-0003-1378-1996](https://orcid.org/0000-0003-1378-1996). **Scopus:** [55513703100](https://scopus.com/authId/detail.uri?authorId=55513703100).

ЗМІСТ

Зміст	7
А.Г. Кевшин, В.В. Галян, Г.П. Шаварова, Н.А. Кевшин Сучасні напрями використання халькогенідних стекел в електроніці та радіоелектроніці.....	10
Г.М. Губаль Автоматизація створення задач з математичного аналізу.....	16
О.П. Чигвінцева, І.В. Рула, Ю.В. Бойко Новий органопластик на основі фенілолу С-2.....	22
М.В. Романенко, О.Д. Казляк, В.В. Романенко Оптимізація процесу газолазерного різання конструкційних матеріалів потужним випромінюванням при моделюванні за повнофакторним експериментом.....	25
М.Є. Черно Неньютонівська природа бурових розчинів: від в'язкості до тиксотропії.....	35
Н.М. Гулієва, Л.М. Самчук, Т.Є. Божко Дослідження гідравлічної проникності сапоніт – титанових фільтрів.....	41
Кондусь В. Ю., Куліков О. А., Андрусяк В. О., Муштай М. В., Твердохлеб А. С., Дідик А. М. Трансформація структури потоку та енергетичні характеристики вільновихрового насоса в режимах часткового навантаження ($Q = 0,05-0,6 Q_{ном}$).....	46
Б. Ю. Мокряк, Р. В. Зінько, Н.А. Тарасов, Р. Я. Качмар, Р.В. Панечко Діагностика автомобільних двигунів на стисненому повітрі з використанням ШП.....	58
В.В. Дацюк, А.П. Павлюк Вплив температурно-вологісного режиму на деформівність згинальних елементів після тривалої експлуатації.....	67
Л.М. Самчук, В.М. Франчук, В.А. Єрмолін Аналіз сучасних та перспективних матеріалів для виготовлення електромобілів.....	74
Б. З. Барабаш, І. Т. Ребезнюк Досліджування впливу параметрів ситової системи барабанних подрібнювачів деревини на фракційність технологійних трісок.....	83
В.В. Ковалишин, В.І. Чайковський Аналіз методів прогнозування руху міського громадського транспорту.....	90
В.М. Мартишко, Ю.О. Гуменюк, О.П. Деркач, Г.А. Герасимчук Механізація і автоматизація садівництва: шлях до сталого та ефективного виробництва.....	100
О. В. Бондарук, А. С. Осадчий, М. С. Вавдійок Оптимізація маршрутів культурної спадщини методами теорії графів: мережа музеїв та "луцькі кликуни".....	111
С.В. Ягелюк, В.С. Пуць, В.Л. Мартинюк Робототехніка – шлях запровадження революції 4,0 у сільському господарстві.....	120
О.В. Захарчук, О.А. Мікуліч, В.І. Захарчук, О.С. Приходько, А.С. Клешишин Вибір способу зварювання чавуну при ремонті та відновленні деталей автомобілів.....	127
С.Б. Мікуліч Симуляційний аналіз взаємодії жорстких включень у пластинчастих елементах за динамічного навантаження.....	133
Б.І. Придальний, Л.М. Самчук, Н.М. Гулієва, В.А. Сичук Підвищення надійності роботизованих виробничих систем на основі діагностики відмов, прогностичного обслуговування та поточного моніторингу.....	138
В.І. Осипенко, С.П. Середюк Експериментальне визначення ефективних режимів та аналітичне моделювання процесу лазерного різання низьковуглецевих сталей оптоволоконним лазером потужністю 12 кВт.....	145
Р.Г. Редько, В.С. Пуць, В.Л. Мартинюк, О.І. Редько Роль та розвиток інженерної етики в Україні.....	154
М.Л. Рябчиков, С.П. Шимчук, Т.П. Зайчук, С.В. Пилипчук Синергетика технологічних процесів: філософсько-технологічне моделювання універсальних принципів виробництва.....	158
С.А. Федосов, О.В. Гуда, Л.В. Яцинський, Т.А. Крадінова, В.М. Тимощук Статистика носіїв заряду в виродженому і невиродженому напівпровіднику.....	167
Б. Троць, Ю.В. Івановський, Л.І. Никируй, О.В. Замуруєва, С.А. Федосов Нанотехнології в енергетиці: переваги, виклики і перспективи.....	172
Ю. Л. Гунько, Ю.В. Федорусь, С.Є. Голячук Визначення точності дозування рідких продуктів за допомогою енергозберігаючого автоматизованого устаткування.....	177
Д.Е. Селезньов, Е.Л. Селезньов, С.Ю. Грицюк Результати досліджень напруженого стану вала кривошипа RV редуктора.....	182
З.С. Сірко, В.В. Ващенко, М.М. Толстушко, О.І. Єременко, Н.О. Толстушко Газогенератор на вуглевмісних компонентах промислових відходів.....	185
О.Є. Нілов, В.В. Ващенко, З.С. Сірко, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко Збереження якості бензину автомобільного в умовах довготривалого зберігання.....	189
К.В. Вавринюк Застосування топологічного аналізу даних для виявлення аномалій у багатовимірних наборах даних.....	194
І.М. Войтюк Ефективність використання мікроструктурного аналізу при оцінці міцнісних характеристик пінополіуретанів.....	199

Н. Медюх, А. Красіков, О. Васільєв Пошук матеріалів, подібних до карбіду бору на основі відкритих обчислювальних баз даних матеріалів.....	205
М.П. Ярошевич, В.С. Пуць, Т.С. Ярошевич, В.Л. Мартинюк Динамічна синхронізація інерційних віброзбудників бігармонічного віброприводу.....	211
В.П. Кашицький, О.Л. Садова, А.В. Чернов, Ю.І. Крась Формування епоксикомполімерів на основі рециклованих наповнювачів синтетичного походження.....	216
С.В. Ягелюк Спектрофотометричні методи оцінювання якості біопалива із стебел льону олійного: значення для сталого розвитку.....	223
В.П. Кашицький, П.П. Савчук, О.Л. Садова Актуальні питання структурних перетворень в полімеркомпозитах під впливом фізичних полів: огляд.....	230
О.О. Гомон, О.М. Суворов Передумови до врахування модифікації хвойних порід деревини в розрахунках дерев'яних елементів та конструкцій	239
О.В. Вдовиченко, М.П. Гадзира, І.Д. Гнилиця, А.М. Колесников, О.В. Талько, Н.Д. Ткачук, А.М. Висоцький Ультразвукові неруйнівні дослідження реакційно спеченого карбіду кремнію, модифікованого карбідом вольфраму.....	243
С.М. Баранович, І.Г. Стукалець, С.В. Коробка, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко Дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритому перепускному каналі прямокутного перерізу з різним співвідношенням сторін.....	249
О.С. Чапюк, О.М. Кратюк До визначення деформівних характеристик конструкційної клеєної деревини за різної вологості в докритичній та закритичній стадіях роботи: експериментальна стадія.....	258

CONTENTS

<i>Contents</i>	7
A.H. Kevshyn, V.V. Halyan, H.P. Shavarova, N.A. Kevshyn Modern trends in the application of chalcogenide glasses in electronics and radio engineering.....	10
H.M. Hubal Automation of the creation of problems in mathematical analysis.....	16
O.P. Chigvintseva, I.V. Rula, Ju.V. Boyko New organoplastic based on phenylon C-2.....	22
M.V. Romanenko, O.D. Kagliak, V.V. Romanenko Optimization of the process of gas laser cutting of structural materials with powerful radiation in modeling by full-factor experiment.....	25
M.Je.Chernova Non-newtonian nature of drilling fluids: from viscosity to thixotropy.....	35
H.M. Huliieva, L.M. Samchuk, T.Ye. Bozhko Study of hydraulic permeability of saponite – titanium filters.....	41
V. Kondus, O. Kulikov, V. Ahdrusiak, M. Mushtai, A. Tverdokhle, A. Didyk Flow structure transformation and energy performance of a torque-flow pump under partial-load conditions ($Q = 0.05-0.6Q_{nom}$).....	46
B. Yu. Mokriak, R. V. Zinko, N. A. Tarasov, R. Ya. Kachmar, R. Panechko Diagnostics of compressed air car engines using AI.....	58
V.V. Datsiuk, A.P. Pavluk Influence of temperature-humidity regime on the deformability of bending elements after long-term operation.....	67
L. Samchuk, V. Franchuk, V. Yeremin Analysis of modern and promising materials for electric car manufacturing.....	74
B. Barabash, I. Rebezniuk Investigation of the influence of the screen system parameters of drum wood chippers on the fractional composition of industrial wood chips.....	83
V. Kovalyshyn, V. Chaikovskiy Analysis of methods for forecasting urban public transport movement..	90
V.M. Martyshko, Yu.O. Gumenyuk, O.P. Derkach, H.A. Herasymchuk Механізація і автоматизація садівництва: шлях до сталого та ефективного виробництва.....	100
O.V. Bondaruk, A. S. Osadchyi, M. S. Vavdiuk Optimization of cultural heritage routes using graph theory methods: museum network and "Lutsk Klikuns".....	111
S. Yaheliuk, V. Puts, V. Martyniuk Robotics – the path to implementing industry 4.0 in agriculture.....	120
O. Zakharchuk, O. Mikulich, V. Zakharchuk, V. Prykhod'ko, A. Klenshyn Selection of cast iron welding method for repair and restoration of automotive components.....	127
S.B. Mikulich Simulation analysis of rigid inclusions interaction in plate elements under dynamic loads.....	133
B.I. Prydalnyi, L.M. Samchuk, N.M. Huliieva, V.A. Sychuk Improving the reliability of robotic manufacturing systems based on fault diagnosis, predictive maintenance, and real-time monitoring.....	138
V.I. Osypenko, S.P. Serediuk Experimental determination of efficient processing parameters and analytical modeling of low-carbon steel laser cutting with a 12 kW fiber laser.....	145
R. Redko, V. Puts, V. Martyniuk, O. Redko Role and development of engineering ethics in Ukraine....	154
M.L. Riabchykov, S.P. Shymchuk, T.P. Zaychuk, S.V. Pylypchuk Synergetics of technological processes: philosophical and technological modeling of universal principles of production.....	158
S. Fedosov, O. Huda, L. Yashchynskyy, T. Kradinova, V. Tymoshchuk Statistics of charge carriers in degenerate and non-degenerate semiconductor.....	167
B. Trots, Yu. Ivanovskiy, L. Nykyruy, O. Zamurujeva, S. Fedosov Nanotechnology in energy: advantages, challenges and prospects.....	172
Y. L. Hunko, Y. V. Fedorus, S. Ye. Holiachuk Determination of the accuracy of liquid products dosing using energy-saving automated equipment.....	177
D.E. Seleznov, E.L. Seleznov, S.Y. Hrytsiuk Results of research on the stress state of the crankshaft of the Rv gearbox.....	182
Z. Sirko, V. Vashchenko, M. Tolstushko, O. Yeremenko N. Tolstushko Gas generator based on carbon components of industrial waste.....	185
O. Nilov, V. Vashchenko, Z. Sirko, M. Tolstushko, N. Tolstushko Preservation of the quality of automotive gasoline during long-term storage.....	189
K. V. Vavryniuk Approaches to topological data analysis for detecting anomalies in multidimensional data sets.....	194
M. Voitiuk Efficiency of microstructure analysis in evaluating the strength characteristics of polyurethane foams.....	199

N. Mediukh, A. Krasikov, O. Vasiliev Data-driven discovery of boron carbide-like materials using open computational materials databases.....	205
M. Yaroshevich, V. Puts, T. Yaroshevych, V. Martyniuk Dynamic synchronization of inertial vibration exciters biharmony vibration drive.....	211
V. Kashytskyi, O. Sadova, A. Chernov, Yu. Kras Formation of epoxy composites based on recycled fillers of synthetic origin.....	216
S. Yaheliuk Spectrophotometric methods for quality assessment of biofuel materials derived from oil flax stems: implications for sustainable development.....	223
V. Kashytskyi, P. Savchuk, O. Sadova Current issues of structural transformations in polymer composite materials under the influence of physical fields: a review.....	230
O.O. Homon, O.M. Suvorov Prerequisites for taking into account modifications of conifers of wood species in calculations of timber elements and structures.....	239
O.V. Vdovychenko, M.P. Gadzyra, I.D. Hnylytsia, A.M. Kolesnykov, O.V. Talko, N.D. Tkachuk, A.M. Vysotskyy Ultrasonic non-destructive study of reaction-sintered silicon carbide modified with tungsten carbide.....	243
S. Baranovych, I. Stukalets, S. Korobka, M. Tolstushko, N. Tolstushko Investigation of hydrodynamic and gas dynamic processes in a closed bypass channel with a rectangular cross-section of varying aspect ratios.....	249
O.S. Chapiuk, O.M. Kratiuk To determination of deformation characteristics of glue-lamed pine and spruce wood at different humidities in the precritical and postcritical stages of work: experimental stage.....	258

А.Г. Кевшин^[0000-0002-3581-8852], В.В. Галяч^[0000-0003-0066-7174], Г.П. Шаварова^[0000-0003-0251-9327], Н.А. Кевшин*Кафедра експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій,
Волинський національний університет імені Лесі Українки***СУЧАСНІ НАПРЯМИ ВИКОРИСТАННЯ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ СТЕКОЛ В
ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА РАДІОЕЛЕКТРОНІЦІ**

У статті проаналізовано сучасні напрями застосування халькогенідних стекол в електроніці та радіоелектроніці. Розглянуто їх використання у фазозмінній пам'яті, нейроморфних системах, сенсорах та пристроях зв'язку 5G/6G. Особливу увагу приділено фотоніці та легуванню іонами ербію для створення компактних оптичних підсилювачів. Визначено ключові технологічні виклики, зокрема питання термічної стабільності та очищення матеріалів.

Ключові слова: халькогенідні стекла, фазозмінна пам'ять, інтегральна фотоніка, нейроморфні системи, іони ербію, оптичні підсилювачі, радіоелектроніка, середній інфрачервоний діапазон.

A.H. Kevshyn, V.V. Halyan, H.P. Shavarova, N.A. Kevshyn

**MODERN TRENDS IN THE APPLICATION OF CHALCOGENIDE GLASSES IN
ELECTRONICS AND RADIO ENGINEERING**

The article provides a comprehensive analysis of modern trends in the application of chalcogenide glasses in electronics and radio engineering. Their key physicochemical properties, which enable a wide range of applications in optoelectronic and electronic devices, are considered. Particular attention is paid to their use in phase-change memory, neuromorphic systems, and sensor technologies. The prospects for integrating chalcogenide glasses into photonic structures, especially in the mid-infrared range, are analyzed. The role of erbium ion doping in the development of efficient waveguide optical amplifiers for telecommunication systems is highlighted. The main technological challenges related to thermal stability, material purification, and compatibility with CMOS technologies are outlined. It is concluded that chalcogenide glasses have significant potential as a fundamental material platform for next-generation electronics and radiophotonics.

Keywords: chalcogenide glasses, phase-change memory, integrated photonics, neuromorphic systems, erbium ions, optical amplifiers, radio electronics, mid-infrared range.

Постановка проблеми. Халькогенідні стекла останніми роками привертають значну увагу завдяки поєднанню унікальних оптичних, електричних та діелектричних властивостей, що робить їх перспективними для сучасної електроніки та радіоелектроніки. Високий потенціал цих матеріалів проявляється у фазових комірках пам'яті, сенсорних пристроях, оптоелектронних компонентах та елементах високочастотної техніки. Разом із тим, практичне застосування халькогенідних стекол у складних електронних системах обмежене через недостатнє розуміння взаємозв'язку їх хімічного складу, структури та електрофізичних характеристик. Тому систематичний огляд сучасних напрямів досліджень і технологічних рішень стає критично важливим для визначення перспектив розвитку та інтеграції цих матеріалів у новітні електронні та радіоелектронні пристрої.

Проблема дослідження. У сучасній електроніці та радіоелектроніці зростає потреба в матеріалах з високою функціональністю, що поєднують електричні, оптичні та теплові властивості, що стимулює інтерес до халькогенідних стекол. Ці аморфні матеріали характеризуються широкою ПЧ прозорістю, високим показником заломлення і можливістю налаштування фізичних параметрів через зміну складу, що робить їх привабливими для фотонних та електронних застосувань [1]. Проте їх складність структури й слабка кореляція між хімічним складом і функціональними властивостями створюють бар'єри для прогнозованого проєктування компонентів на їх основі. Через це існує гостра потреба у систематичному узагальненні наукових даних щодо їх властивостей і технологій обробки.

Особливо актуальним є вивчення тонкоплівкових і структурованих халькогенідних систем, здатних забезпечити інтеграцію в мікроелектронні та оптоелектронні пристрої із низькими втратами та високою стабільністю. Розвиток технологій вирощування плівок і композитів на їх основі продовжує розширювати можливості для створення ПЧ фотодетекторів, хвилеводів та активних фотонних елементів [2]. Водночас, відсутність узгоджених моделей поведінки таких шарів у робочих умовах обмежує їх комерціалізацію. Це робить необхідним узагальнення сучасних досягнень і технологічних викликів для подальшого просування галузі.

У радіоелектроніці халькогенідні матеріали мають потенціал для використання в компонентній базі високочастотних пристроїв завдяки їх діелектричним і радіочастотним властивостям. Проте вплив структури стекол на втрати сигналу і їх поведінка під високочастотними навантаженнями досі недостатньо вивчені у порівнянні з традиційними

діелектриками. Через це практичне застосування таких матеріалів у фільтрах, хвилеводах та системах 5G/6G залишається обмеженим і потребує подальших фундаментальних і прикладних досліджень. Таким чином, у науковому співтоваристві постає завдання узагальнити сучасні тренди і критично оцінити їхній потенціал у радіоелектронних застосуваннях. Крім того, інтеграція халькогенідних стекел із традиційними кремнієвими та CMOS технологіями стикається з численними технологічними бар'єрами, пов'язаними з термічною стабільністю та сумісністю процесів виготовлення. Наявні дослідження демонструють обмежений прогрес у створенні надійних міжматеріальних інтерфейсів і контролі дефектів структури, що впливають на надійність пристроїв. Це підкреслює потребу у системному огляді технічних і матеріалознавчих викликів, що стоять на шляху впровадження халькогенідних стекел у практичні електронні рішення. Аналіз актуальних наукових здобутків дозволить окреслити перспективні напрями досліджень і розробок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Халькогенідні склоподібні напівпровідники (ХСН) на сьогодні залишаються одним із найбільш перспективних об'єктів у матеріалознавстві завдяки їхнім унікальним оптичним та електричним властивостям. Сучасні дослідження акцентують увагу на здатності цих матеріалів до швидких фазових переходів під впливом зовнішніх впливів [3]. Основний інтерес вчених зосереджений на сполуках систем Ge-Sb-Te та Ag-In-Sb-Te, які демонструють високу стабільність станів. Саме ці хімічні склади дозволяють створювати енергонезалежну пам'ять нового покоління, що перевершує традиційні кремнієві аналоги за швидкістю запису [4; 5].

Одним із ключових напрямів використання халькогенідів у сучасній радіоелектроніці є розробка оптичних перемикачів та модуляторів для фотонних інтегральних схем. Останні публікації демонструють успішні експерименти з інтеграції халькогенідних плівок у кремнієву фотоніку для керування світловими сигналами на нанорівні. Високий показник заломлення та прозорість в інфрачервоному діапазоні роблять ці стекла незамінними для сенсорів нічного бачення та систем лідарів. Використання тонкопліткових структур на основі халькогенідів дозволяє значно зменшити габарити пристроїв без втрати їхньої чутливості [6].

В роботі [7] описано створення мемристорів на основі ХСН, що здатні до пластичної зміни провідності. Такі пристрої забезпечують апаратну реалізацію штучних нейронних мереж з наднизьким енергоспоживанням, що є критичним для мобільних платформ. Завдяки здатності зберігати континуум станів опору, халькогенідні системи стають базою для архітектур, що виходять за межі класичної моделі фон Неймана.

У сфері гнучкої електроніки халькогенідні стекла відкривають нові горизонти для створення переносних пристроїв та «розумного» одягу. Сучасні дослідження підтверджують, що аморфна структура цих матеріалів дозволяє їм зберігати стабільні характеристики навіть при значних механічних деформаціях. Вчені активно тестують халькогенідні термоелектричні генератори, які здатні перетворювати тепло людського тіла в електроенергію для живлення біосенсорів. Це дозволяє створювати повністю автономні медичні моніторингові системи, що не потребують традиційних акумуляторів [8; 9].

Окремим вектором досліджень є використання халькогенідів у радіочастотних (РЧ) системах та пристроях зв'язку формату 5G/6G. Останні дослідження вказують на високу ефективність фазозмінних перемикачів у фільтрах та антенах з перебудовою частоти. Такі компоненти характеризуються низькими втратами сигналу в міліметровому діапазоні хвиль, що є вирішальним для високошвидкісної передачі даних. Застосування халькогенідів дозволяє реалізувати динамічну конфігурацію радіоканалів у реальному часі, підвищуючи пропускну здатність мереж [10].

Останніми роками зростає інтерес до оптичних матеріалів і волокон для середнього інфрачервоного (СІЧ) діапазону, що обумовлено потребами охорони здоров'я, екології та оборонними застосуваннями. СІЧ-діапазон містить атмосферно прозорі вікна (3–5 μm і 8–12 μm), придатні для тепловізійного зображення у військових та цивільних системах. Халькогенідні мікроструктуровані оптичні волокна (МОВ) поєднують пропускання халькогенідних стекел до 18 μm з унікальними оптичними властивостями завдяки широким можливостям проектування їх геометрії. Сучасні методи лазерного осадження та 3D-друку дозволяють створювати складні геометричні форми з халькогенідів з високою точністю. Це відкриває шлях до масового виробництва дешевих та безпечних компонентів для побутової електроніки та промислової автоматизації [11].

Викладення основного матеріалу. Халькогенідні стекла впродовж останніх двох десятиліть перетворилися з вузькоспеціалізованих матеріалів фізики аморфного стану на одну з ключових матеріальних платформ сучасної електроніки та радіоелектроніки. Їхня наукова й прикладна привабливість зумовлена унікальним поєднанням електричних, оптичних і структурних властивостей, які можуть цілеспрямовано змінюватися шляхом варіювання хімічного складу, способів осадження плівок і термічної обробки. Саме ця керованість робить халькогенідні стекла універсальними функціональними матеріалами для енергонезалежної пам'яті, селекторів кросбар-матриць, мемристивних і нейроморфних елементів, а також для інтегральної фотоніки й mid-IR сенсоріки [12].

Одним із найважливіших напрямів використання халькогенідних стекел є фазозмінна електронна пам'ять. Матеріали системи Ge–Sb–Te, зокрема класичний склад Ge₂ Sb₂ Te₅, здатні швидко й оборотно переходити між аморфним і кристалічним станами, демонструючи при цьому різницю електричного опору в кілька порядків [13]. Це явище лежить в основі phase-change memory (PCM), яка розглядається як перспективна альтернатива традиційним типам енергонезалежної пам'яті. Сучасні дослідження зосереджені не лише на підвищенні швидкості перемикавання, але й на зниженні енергії програмування, стабілізації аморфного стану та зменшенні дрейфу параметрів під час тривалої експлуатації [14]. Важливою тенденцією є легування GST-матеріалів і розробка нових фазозмінних складів, зокрема на основі систем Ge–Sb–Se–Te, які поєднують прийнятні електричні характеристики з покращеними оптичними властивостями, що відкриває можливості для їх використання в оптоелектроніці та фотоніці [15].

Розвиток щільних масивів пам'яті неминуче пов'язаний із проблемою паразитних струмів у кросбар-архітектурах, тому поряд із PCM активно досліджуються селекторні елементи. У цьому контексті особливе місце займають оновічні порогові перемикачі (ovonic threshold switching, OTS), створені на основі аморфних халькогенідних сплавів. OTS-матеріали характеризуються різким нелінійним переходом у провідний стан при досягненні порогової напруги та поверненні у високорезистивний стан після зняття електричного поля. Така поведінка дозволяє ефективно пригнічувати витоки струму в матрицях пам'яті та підвищувати їх масштабованість. Аналіз сучасної літератури свідчить про те, що халькогенідні OTS-селектори зберігають лідерство серед компонентів, необхідних для масштабування архітектур типу 1S1R чи 1S1M у системах збереження даних [15]. При цьому значна увага приділяється вивченню фізичних механізмів порогового перемикавання, деградації матеріалу при багаторазових циклах, а також розробці арсенік-вільних складів з огляду на екологічні та регуляторні вимоги [16].

Поза межами класичної пам'яті халькогенідні стекла дедалі активніше застосовуються в мемристивних і нейроморфних системах. Їхня здатність реалізовувати багаторівневі стани провідності, а також поступові й керовані зміни опору робить такі матеріали придатними для моделювання синаптичних ваг у апаратних нейромережах і для концепцій обчислень у пам'яті (in-memory computing). У сучасних роботах наголошується, що ключовими параметрами для таких застосувань є лінійність перемикавання, рівень шуму, стабільність проміжних станів і відтворюваність характеристик у великих масивах [17]. Водночас активно застосовуються методи машинного навчання та високопродуктивного моделювання для пошуку нових халькогенідних складів із заданими властивостями, що свідчить про перехід від емпіричного до дано-орієнтованого матеріального дизайну [18].

Не менш важливим є використання халькогенідних стекел у радіоелектроніці та фотоніці, зокрема, в середньому інфрачервоному діапазоні. Завдяки високому показнику заломлення, широкій прозорості в області приблизно 2–20 мкм і можливості формування тонкопліткових хвилеводів ці матеріали стали однією з базових платформ для mid-IR інтегральної фотоніки [19]. У численних оглядових роботах халькогенідні стекла розглядаються поряд із кремнієвими та германієвими технологіями як ключові матеріали для створення компактних спектрометрів, сенсорів газів і біомедичних діагностичних систем. Практичні дослідження зосереджені на зниженні оптичних втрат у хвилеводах, оптимізації технологій осадження та травлення, а також на інтеграції з mid-IR джерелами випромінювання, зокрема квантово-каскадними лазерами [20; 21].

Окремий і швидко зростаючий напрям пов'язаний із використанням фазозмінних халькогенідних матеріалів в оптичних і фотонних пристроях. Перехід між аморфним і кристалічним станами супроводжується значною зміною оптичних констант, що дозволяє створювати програмовані фотонні елементи, такі як фазові модулятори, перемикачі та реконфігуровані резонатори. На відміну від електронної пам'яті, тут особливо ціниться здатність матеріалу зберігати заданий оптичний стан без додаткового енергоспоживання, що відкриває шлях до енергоефективних фотонних схем [17]. Досліджуються також альтернативні методи обробки,

© А.Г. Кевшин, В.В. Галян, Г.П. Шаварова, Н.А. Кевшин

зокрема розчинні та низькотемпературні технології формування оптичних фазозмінних плівок, які можуть бути привабливими для масштабного виробництва [22].

Хоча основна увага в електроніці зосереджена на електронному перенесенні заряду, варто відзначити й суміжний напрям використання халькогенідних склоподібних матеріалів як іонних провідників у твердотільних акумуляторах. Сульфідні системи на основі $\text{Li}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$ та модифіковані склади демонструють високу іонну провідність і хорошу технологічну сумісність, що робить їх перспективними для живлення автономних електронних і сенсорних пристроїв [23]. Хоча ці матеріали не виконують безпосередньо функцій активних елементів радіоелектроніки, вони формують матеріальну основу для інтегрованих електронних систем нового покоління.

Стрімкий розвиток інформаційних технологій, спрямований на підвищення швидкодії обробки даних та подальшу мініатюризацію компонентів, призводить до того, що традиційна кремнієва електроніка наближається до фундаментальних фізичних обмежень. Це сприяє активному пошуку нових матеріальних платформ, які забезпечують ефективну взаємодію між електронними та фотонними процесами в інтегрованих системах. Зокрема, халькогенідні стекла, леговані рідкоземельними іонами, такими як ербій (Er^{3+}), розглядаються як перспективний матеріал для фотонних пристроїв високої продуктивності. Такі системи досліджуються як потенційна основа для інтегрованих хвилевідних підсилювачів та оптичних сенсорів у ближньому і середньому інфрачервоному діапазонах [24].

Іони ербію мають внутріцентрові оптичні переходи, що відповідають довжині хвилі близько 1,55 мкм – спектральній області, де оптичні волокна демонструють найнижчі втрати. Це робить Er^{3+} -леговані середовища ключовими для активних компонентів у телекомунікаціях. Зокрема, в якості таких матеріалів можна використовувати сульфідні та селенідні ХСН.

На рис. 1 представлено спектр фотолюмінесценції склоподібних сплавів системи $(\text{X})(\text{Er}_2\text{Se}_3)-(100-\text{X})(20 \text{ мол.}\% \text{Ga}_2\text{Se}_3-80 \text{ мол.}\% \text{GeSe}_2)$. Як видно, зміна вмісту іонів ербію дає змогу керувати інтенсивністю люмінесценції, що сприяє розширенню можливостей їх практичного використання.

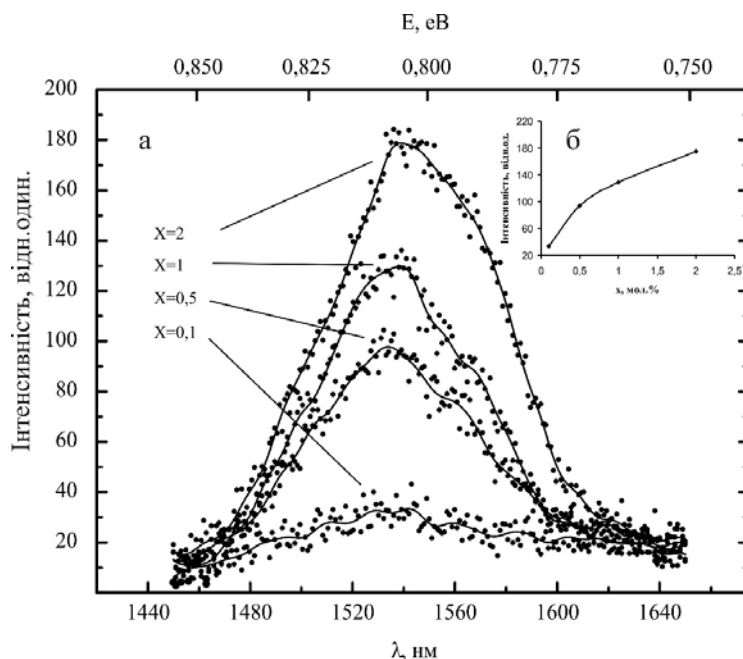


Рис. 1. а) Спектри фотолюмінесценції склоподібних сплавів системи $(\text{X})(\text{Er}_2\text{Se}_3) - (100-\text{X})(20 \text{ мол.}\% \text{Ga}_2\text{Se}_3 - 80 \text{ мол.}\% \text{GeSe}_2)$; б) залежність інтенсивності люмінесценції в максимумі (~1530 нм) від концентрації Er_2Se_3 , мол.%. Температура вимірювання 298 К [25].

Інтеграція ербію безпосередньо в халькогенідні матриці дозволяє створювати компактні хвилевідні підсилювачі, що можуть бути реалізовані безпосередньо у світловодах на кремнієвих чипах. Такі підсилювачі демонструють суттєвий коефіцієнт підсилення в декілька дБ/см у С-діапазоні (біля 1,54–1,55 мкм), що підтверджується експериментальними даними [26]. Це особливо важливо для радіофотонних систем, де радіочастотні сигнали передаються та обробляються в оптичному домені, що дозволяє суттєво зменшити рівень електромагнітних завад і забезпечити значне розширення смуги пропускання, зокрема для мереж стандартів 5G та перспективних 6G.

На сьогодні активні халькогенідні матеріали застосовуються у низці пріоритетних науково-технологічних напрямів. В інтегральній фотоніці вони використовуються для реалізації оптичних підсилювачів і комутаційних елементів у центрах обробки даних, де швидкості передавання інформації досягають терабітного рівня [27]. У сфері сенсорики та систем нічного бачення прозорість халькогенідних стекел у середньому інфрачервоному діапазоні дає змогу створювати лазерні сенсори з високою спектральною чутливістю, придатні для детекції газових домішок або використання в навігаційних і прицільних системах [28]. Окремий інтерес становлять нейроморфні обчислювальні системи, де фазові переходи в халькогенідних структурах під дією електричного струму або оптичного випромінювання дозволяють реалізувати елементи пам'яті, функціонально подібні до біологічних нейронів [29].

Разом із тим, практичне впровадження халькогенідних стекел, легованих ербієм, супроводжується низкою технологічних труднощів. Ключовою проблемою залишається необхідність глибокого очищення матеріалу від домішок кисню та гідроксильних груп, які навіть у надзвичайно малих концентраціях призводять до суттєвого пригнічення люмінесценції іонів Er^{3+} [28]. Крім того, тривають дослідження, спрямовані на підвищення механічної надійності та термічної стабільності халькогенідних структур з метою їх сумісності зі стандартними CMOS-технологіями виробництва мікроелектронних схем [29].

Висновки. Проведений аналіз підтверджує, що халькогенідні стекла сьогодні є фундаментальною платформою для розробки енергонезалежної пам'яті PCM та нейроморфних систем, що базуються на здатності матеріалу до швидких фазових переходів. Завдяки унікальній прозорості в ІЧ-діапазоні та високому показнику заломлення ці сполуки відкривають шлях до створення надчутливих сенсорів і компактної інтегральної фотоніки. Особливу цінність має легування матриць іонами ербію, яке дозволяє виготовляти ефективні хвилевідні підсилювачі для оптичних мереж 5G/6G безпосередньо на кремнієвих чипах. Крім того, аморфна природа халькогенідів робить їх перспективними для гнучкої електроніки та нових типів твердотільних акумуляторів. У підсумку, успішна комерціалізація таких пристроїв прямо залежить від вирішення технологічних проблем очищення сировини та забезпечення термічної сумісності з сучасними CMOS-процесами.

Список використаних джерел:

1. Halyan V.V., Kevshyn A.H., Ivashchenko I.A. *et al.* Near- and Mid-Infrared Emissions from $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$: Er, Nd Glasses. *Ukr. J. Phys.* 2025. Vol. 70, № 1. P. 48–55. DOI: [10.15407/ujpe70.1.48](https://doi.org/10.15407/ujpe70.1.48)
2. Soumya Suresh, Sheenu Thomas. Studies on chalcogenide glass solution-processed films towards IR photonics applications. *Materials Today: Proceedings.* 2023. Vol. 93, № 2. P. 9–12. DOI: [10.1016/j.matpr.2023.08.086](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.086)
3. Xiaozhang Chen, Yuan Xue, Yibo Sun *et al.* Neuromorphic Photonic Memory Devices Using Ultrafast, Non-Volatile Phase-Change Materials. *Adv. Mater.* 2023. Vol. 35, № 37. e2203909. DOI: [10.1002/adma.202203909](https://doi.org/10.1002/adma.202203909)
4. Hanyi Zhang, Xudong Wang, Wei Zhang. First-principles investigation of amorphous Ge-Sb-Se-Te optical phase-change materials. *Optical Materials Express.* 2022. Vol. 12, № 7. P. 2497–2506. DOI: [10.1364/OME.462846](https://doi.org/10.1364/OME.462846)
5. Dasol Kim, Taek Sun Jung, Hanjin Park *et al.* Phase-change mechanism and role of each element in Ag-In-Sb-Te: Chemical bond evolution. *Applied Surface Science.* 2021. Vol. 544, № 1. 148838. DOI: [10.1016/j.apsusc.2020.148838](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148838)
6. Kangjian Bao, Boshu Sun, Kunhao Lei *et al.* Interlayer Silicon-Chalcogenide waveguide coupler for heterogeneous integration photonics. *Optical Materials.* 2025. Vol. 159. 116622. DOI: [10.1016/j.optmat.2024.116622](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116622)
7. Su Yeon Lee, Jin Joo Ryu, Hyun Kyu Seo *et al.* Ag-dispersive chalcogenide media for readily activated electronic memristor. *Applied Surface Science.* 2024. Vol. 644. 158747. DOI: [10.1016/j.apsusc.2023.158747](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158747)
8. Shiliang Kang, Yanqing Fu, Hao Gu, Changgui Lin. Chalcogenide glass for thermoelectric application. *Journal of Non-Crystalline Solids: X.* 2022. Vol. 15. 100111. DOI: [10.1016/j.nocx.2022.100111](https://doi.org/10.1016/j.nocx.2022.100111)
9. Yimei Deng, Meng Wei, Yan Lei *et al.* Advances in silver-based chalcogenide flexible thermoelectric materials. *CrystEngComm.* 2025. Vol. 27. P. 1055–1077. DOI: [10.1039/D4CE00915K](https://doi.org/10.1039/D4CE00915K)
10. Chen K. *et al.* Chalcogenide phase-change material advances programmable terahertz metamaterials: a non-volatile perspective for reconfigurable intelligent surfaces. *Nanophotonics.* 2024. Vol. 13, № 12. P. 2101–2105. DOI: [10.1515/nanoph-2023-0645](https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0645)

11. Troles J., Carcreff J., Chevire F. *et al.* Fabrication of chalcogenide microstructured optical preforms and fibers by additive manufacturing of chalcogenide glasses. *Proceedings Vol. 12417, Optical Components and Materials XX*. 2023. 1241702. DOI: [10.1117/12.2651253](https://doi.org/10.1117/12.2651253)
12. Pengfei Liu, Jae Won Heo, Hyeonmin Bong *et al.* Synthesis of functional chalcogenide materials for memory/sensing devices and their integration into artificial sensory systems. *Int. J. Extrem. Manuf.* 2026. Vol. 8., № 2. 022003. DOI: [10.1088/2631-7990/ae1db9](https://doi.org/10.1088/2631-7990/ae1db9)
13. Gerislioglu B., Bakan G., Ahuja R. *et al.* The role of Ge₂Sb₂Te₅ in enhancing the performance of functional plasmonic devices. *Materials Today Physics*. 2020. Vol. 12. 100178. DOI: [10.1016/j.mtphys.2020.100178](https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100178)
14. Neeru Bala, Bheem Khan, Kamaljit Singh *et al.* Recent advances in doped Ge₂Sb₂Te₅ thin film based phase change memories. *Mater. Adv.* 2023. Vol. 4. P. 747–768. DOI: [10.1039/D2MA01047J](https://doi.org/10.1039/D2MA01047J)
15. Zihao Zhao, Sergiu Clima, Daniele Garbin *et al.* Chalcogenide Ovonic Threshold Switching Selector. *Nano-Micro Lett.* 2024. Vol. 16, № 1. 81. DOI: [10.1007/s40820-023-01289-x](https://doi.org/10.1007/s40820-023-01289-x)
16. Sanghyun Ban, Jangseop Lee, Yoori Seo *et al.* Advances in Ovonic Threshold Switch Selector Technologies for Storage Class Memory: From Fundamentals to Development and Beyond. *Adv. Electron. Mater.* 2025. Vol. 11. 2400665. DOI: [10.1002/aelm.202400665](https://doi.org/10.1002/aelm.202400665)
17. Yi-Siou Huang, Chih-Yu Lee, Ichiro Takeuchi and Carlos A. Ríos Ocampo. Optical Phase Change Materials. *Annual Review of Materials Research*. 2025. Vol. 25. P. 255–283. DOI: [10.1146/annurev-matsci-080522-094849](https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-080522-094849)
18. Shivani Bhawsar and Eui-Hyeok Yang. Recent advances in machine learning and deep learning-enabled studies on transition metal dichalcogenides. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2024. Vol. 58, № 7. 073005. DOI: [10.1088/1361-6463/ad9933](https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad9933)
19. Jean-Luc Adam, Laurent Calvez, Johann Troles, Virginie Nazabal. Chalcogenide Glasses for Infrared Photonics. *International Journal of Applied Glass Science*. 2015. Vol. 6, №3. P. 287–294. DOI: [10.1111/ijag.12136](https://doi.org/10.1111/ijag.12136)
20. Jordan Goldstein, Hongtao Lin, Skylar Deckoff-Jones *et al.* Waveguide-integrated mid-infrared photodetection using graphene on a scalable chalcogenide glass platform. *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. 3915. DOI: [10.1038/s41467-022-31607-7](https://doi.org/10.1038/s41467-022-31607-7)
21. Abdolnasser Zakery, S. R. Elliott. Optical Properties and Applications of Chalcogenide Glasses: A Review. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2023. Vol. 330, № 1–3. P. 1–12. DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2003.08.064](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2003.08.064)
22. Daniel Wiedeman, Rashi Sharma, Eric Bissell *et al.* Solution-based processing of Ge₂Sb₂Se₄Te optical phase change materials. *Optical Materials Express*. 2024. Vol. 14, №12. P. 2874–2883. DOI: [10.1364/OME.542387](https://doi.org/10.1364/OME.542387)
23. Jihun Roh, Namgyu Do, Hyungjin Lee *et al.* Towards practical all-solid-state batteries: structural engineering innovations for sulfide-based solid electrolytes. *Energy Mater.* 2025. Vol. 5. 500061. DOI: [10.20517/energymater.2024.219](https://doi.org/10.20517/energymater.2024.219)
24. Halyan V.V., Kityk I.V., Kevshyn A.H. *et al.* Effect of temperature on the structure and luminescence properties of Ag_{0.05}Ga_{0.05}Ge_{0.95}S₂–Er₂S₃ glasses. *Journal of Luminescence*. 2017. Vol. 181. P. 315–320. DOI: [10.1016/j.jlumin.2016.09.022](https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.09.022)
25. Давидюк Г.Є., Галян В.В., Парасюк О.В., Кевшин А.Г., Когут Ю. Оптичне поглинання і фотолюмінісценція склоподібних сплавів системи Er₂Se₃–Ga₂Se₃–GeSe₂. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2010. Т. 11, № 1. С. 68–71.
26. Tamilarasan Sabapathy, Arunbabu Ayiriveetil, Ajoy K. Kar *et al.* Direct ultrafast laser written C-band waveguide amplifier in Er-doped chalcogenide glass. *Optical Materials Express*. 2012. Vol. 2, № 11. P. 1556–1561. DOI: [10.1364/OME.2.001556](https://doi.org/10.1364/OME.2.001556)
27. Yan K. Rare-earth ion doped chalcogenide waveguide amplifiers : diss. ... PhD : 01.04.05 / Kunlun Yan ; The Australian National University. Canberra, 2018. 174 p.
28. Legang Li, Junyi Bian, Qing Jiao *et al.* GeS₂–In₂S₃–CsI Chalcogenide Glasses Doped with Rare Earth Ions for Near- and Mid-IR Luminescence. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. 37577. DOI: [10.1038/srep37577](https://doi.org/10.1038/srep37577)
29. Chandresh Kumari, S.C. Katyal, Pankaj Sharma. Role of rare earth on the spectral properties of chalcogenide glassy alloys: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 80, № 3. P. 1882–1884. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.05.632](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.632)

Дата надходження статті до видання: 23.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

Г.М. Губаль ^[0000-0002-8824-4565]

Луцький національний технічний університет

АВТОМАТИЗАЦІЯ СТВОРЕННЯ ЗАДАЧ З МАТЕМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ

У цій статті розширено функціональність системи LaTeX для автоматичного створення математичних виразів теорії границь математичного аналізу методами програмування мовою LaTeX. При цьому створено нові команди. Створені нові команди прискорюють створення та оновлення математичних документів і забезпечують гнучкість зміни параметрів. Ці команди можуть бути використані для підготовки наукових публікацій та навчальних матеріалів з математичного аналізу.

Ключові слова: LaTeX, автоматизація, команди, границі, математичний аналіз.

H.M. Hubal

AUTOMATION OF THE CREATION OF PROBLEMS IN MATHEMATICAL ANALYSIS

In order to automatically create mathematical expressions for mathematical analysis, in particular mathematical expressions for the theory of limits, it is advisable to use the LaTeX programming language. In this article, the functionality of the LaTeX system was expanded to automatically create mathematical expressions for the theory of limits of mathematical analysis through programming methods using the LaTeX programming language. New commands were created. The created new commands accelerate the creation and updating of mathematical documents and provide flexibility in changing parameters. The created new commands can be used to prepare scientific publications and educational materials on mathematical analysis.

Keywords: LaTeX, automation, commands, limits, mathematical analysis.

Formulation of the problem. The modern stage of the development of mathematics is characterized by a growing need for the automation of data processing, calculations, and document creation. One of the main sections on mathematical analysis is the theory of limits that is used in the sections on mathematical and functional analysis, and other disciplines.

Existing approaches to creating problems in the theory of limits mainly use manual mode. This restricts the variability of parameters and the flexibility of their change and complicates the systematic analysis of the structure of problems.

In order to automatically create mathematical expressions, in particular expressions for the theory of limits of mathematical analysis, it is advisable to use the LaTeX programming language. The LaTeX system supports random number generation, which makes it possible to automate the creation of mathematical expressions.

The relevance of this investigation is the need to create algorithms for automatic generation of mathematical expressions for the theory of limits of different levels of difficulty. This will simplify and accelerate the work of scientists, educators, and students.

The aim of this investigation is to create new commands for the automatic creation of mathematical expressions for the theory of limits in the LaTeX programming language in the LaTeX system.

Analysis of recent research and publications. The LaTeX system is a sophisticated system for creating scientific and educational documents and for performing computations [1-7]. Researchers conduct their research in the LaTeX system creating complex formulas and performing complex formatting in their publications [8-14]. The LaTeX programming language can also be used in learning management systems to improve the quality of education [15-20].

The built-in commands in the system core and the ability to create new commands in the LaTeX system enable to automate the creation of scientific and educational documents of different levels of difficulty and to automate the execution of computations [6], [21-24].

The issues of automating document creation and computations in the LaTeX system are relevant and important [6], [21-26]. Automation in the LaTeX system simplifies and accelerates various computations, the creation and updating of documents, reduces program code, provides a logical document structure and flexibility in changing parameters [6], [27-36].

Main results. In the LaTeX system, we will create new commands for automatic creation of mathematical expressions for the theory of limits of mathematical analysis.

To do this, in the LaTeX document of the article type, we use the amsmath package (this package creates mathematical formulas) and the amssymb package (this package includes additional mathematical symbols). We also use the TikZ package for using `\foreach` loops and for computations using `\pgfmath`.

Let us create a new command `\limitcompare` that takes one argument (the number of problems). This command generates a limit with the expressions that need to be compared. In this command, we organize the number of problems by looping. Using the `\pgfmathparse` command, we compute a mathematical expression by generating a random integer from 2 to 9 with the `\random(2,9)` command. We store this result in the `\pgfmathresult` variable. We copy the value of this variable into the variable `\nmbfirst`. Similarly to the previous one, we generate the second random integer from 2 to 8 and store the result in the `\nmbsecond` variable. We generate the third random integer from 1 to 9 and store the result in the `\nmbthird` variable.

We print the problem by creating the `\item` of the enumerated list. The `\item` will be printed inside the `enumerate` environment that we write in the body of the LaTeX document.

The program code of this command is shown in Fig. 1.

```
\documentclass[a4paper,12pt]{article}
\usepackage{amsmath}
\usepackage{amssymb}
\usepackage{tikz}

\newcommand{\limitcompare}[1]{%
  \foreach \i in {1,...,#1} {
    \pgfmathparse{random(2,9)}
    \let\nmbfirst=\pgfmathresult
    \pgfmathparse{random(2,8)}
    \let\nmbsecond=\pgfmathresult
    \pgfmathparse{random(1,9)}
    \let\nmbthird=\pgfmathresult
    \item Find the limit  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\nmbfirst - \nmbfirst \cdot \nmbsecond^{n+1}}{(\sqrt{\nmbsecond})^n + e^{n + \nmbthird}}$ 
  }
}
```

Fig. 1. The creation of the `\limitcompare` command

Let us create a new command `\limitirrat` that takes one argument. This command generates a limit with irrationalities. Similar to the previously created command, in the loop, using the `\pgfmathparse` command, we compute the mathematical expression by generating a random integer from 2 to 9 with the `\random(2,9)` command. We store this result in the `\pgfmathresult` variable. We copy the value of this variable into the `\nmfirst` variable.

In this problem, we compute the expression `\nmfirst * 2` and return the result using the `\numexpr` command, and convert the result of the computing to text using the `\the` command. The `\relax` command completes this computing.

We print the problem by creating the `\item` of the enumerated list.

The program code of the `\limitirrat` command is shown in Fig. 2.

```
\newcommand{\limitirrat}[1]{%
  \foreach \i in {1,...,#1} {
    \pgfmathparse{random(2,9)}
    \let\nmfirst=\pgfmathresult
    \item Find the limit  $\lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{\sqrt{n^2 + \nmfirst}} + \frac{1}{\sqrt{n^2 + \the\numexpr\nmfirst * 2\relax}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{n^2 + \nmfirst n}} \right)$ 
  }
}
```

Fig. 2. The creation of the `\limitirrat` command

Let us create a new command `\limitparam` with one argument. This command generates a limit with a parameter. In a loop using the `\pgfmathparse` command, we compute the mathematical expression by generating a random integer from 2 to 19 with the `\random(2,19)` command. We copy the result stored in the `\pgfmathresult` variable into the `\nmrfirst` variable.

Similarly, we print this limit with the `\item` of the enumerated list.

The program code of the `\limitparam` command is shown in Fig. 3.

```

\newcommand{\limitparam}[1]{%
  \foreach \i in {1,...,#1} {
    \pgfmathparse{random(2,19)}
    \let\nmrfirst=\pgfmathresult
    \item Find the limit  $\lim_{n \to \infty} \sqrt[n]{1^{\nmrfirst}+2^{\nmrfirst}+3^{\nmrfirst}+\dots+n^{\nmrfirst}+u^{2n}}$ 
  }
}

```

Fig. 3. The creation of the `\limitparam` command

Let us create a new command `\limitsmall` with one argument. This command generates a limit with an infinitesimal sequence. Similarly to the previously created commands, in the loop, we compute the mathematical expression by generating a random integer from 2 to 9 and copying the result into the `\nmbrfirst` variable. Similarly, we create and copy the generated random integers from 10 to 15 and from 8 to 16 into the `\nmbrsecond` variable and the `\nmbrthird` variable respectively.

We print this problem with the `\item` of the enumerated list.

The program code of the `\limitsmall` command is shown in Fig. 4.

```

\newcommand{\limitsmall}[1]{%
  \foreach \i in {1,...,#1} {
    \pgfmathparse{random(2,9)}
    \let\nmbrfirst=\pgfmathresult
    \pgfmathparse{random(10,15)}
    \let\nmbrsecond=\pgfmathresult
    \pgfmathparse{random(8,16)}
    \let\nmbrthird=\pgfmathresult
    \item Find the limit  $\lim_{n \to \infty} \frac{\sin(n^{\nmbrthird} - \nmbrfirst)}{\sqrt{n^{\nmbrfirst} + n^{\nmbrsecond}}}$ 
  }
}

```

Fig. 4. The creation of the `\limitsmall` command

In order to generate different random integers after each compilation of the LaTeX document (at different times), we configure the random number generator in the body of the LaTeX document using the `\pgfmathsetseed` command of the TikZ package.

We invoke the `\limitcompare` command by giving it the parameter `2`. As a result of compilation, this command generates two limits with mathematical expressions that need to be compared.

We invoke the `\limitirrat` command by giving it the parameter `2`. As a result of compilation, this command generates two limits with irrationalities.

We invoke the `\limitparam` command by giving it the parameter `3`. As a result of compilation, this command generates three limits with a parameter.

We invoke the `\limitsmall` command by giving it the parameter `2`. As a result of compilation, this command generates two limits with infinitesimal sequences.

The program code in the body of the LaTeX document with the invocations of the created commands is shown in Fig. 5.

The program codes shown in Figs. 1-5 generate the result shown in Fig. 6.

Conclusions. In this article, the new commands `\limitcompare`, `\limitirrat`, `\limitparam`, and `\limitsmall` that automatically create mathematical expressions for the theory of limits of mathematical analysis were created.

The created new commands accelerate the creation and updating of mathematical documents and provide flexibility in changing parameters.

These commands can be used to prepare scientific publications and educational materials on mathematical analysis.

Thus, in this article, the functionality of the LaTeX system was expanded to automatically create mathematical expressions for the theory of limits of mathematical analysis.

```

\begin{document}
\section*{Problems in Mathematical Analysis}

\pgfmathsetseed{\number\numexpr\year*10000+\month*100+\day+
\time\relax}

\subsection*{Example of using the \texttt{\textbackslash
limitcompare} command}

\begin{enumerate}
\limitcompare{2}
\end{enumerate}

\subsection*{Example of using the \texttt{\textbackslash
limitirrat} command}

\begin{enumerate}
\limitirrat{2}
\end{enumerate}

\subsection*{Example of using the \texttt{\textbackslash
limitparam} command}

\begin{enumerate}
\limitparam{3}
\end{enumerate}

\subsection*{Example of using the \texttt{\textbackslash
limitsmall} command}

\begin{enumerate}
\limitsmall{2}
\end{enumerate}

\end{document}

```

Fig. 5. The program code in the body of the LaTeX document with the invocations of the created commands

Problems in Mathematical Analysis

Example of using the `\limitcompare` command

1. Find the limit $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3 - 3 \cdot 5^{n+1}}{(\sqrt{5})^n + e^{n+5}}$
2. Find the limit $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2 - 2 \cdot 3^{n+1}}{(\sqrt{3})^n + e^{n+2}}$

Example of using the `\limitirrat` command

1. Find the limit $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\sqrt{n^2 + 3}} + \frac{1}{\sqrt{n^2 + 6}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{n^2 + 3n}} \right)$
2. Find the limit $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\sqrt{n^2 + 5}} + \frac{1}{\sqrt{n^2 + 10}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{n^2 + 5n}} \right)$

Example of using the `\limitparam` command

1. Find the limit $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{1^{18} + 2^{18} + 3^{18} + \dots + n^{18} + u^{2n}}$
2. Find the limit $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{1^7 + 2^7 + 3^7 + \dots + n^7 + u^{2n}}$
3. Find the limit $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{1^{10} + 2^{10} + 3^{10} + \dots + n^{10} + u^{2n}}$

Example of using the `\limitsmall` command

1. Find the limit $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(n^{14} - 9)}{\sqrt{n^9 + n^{10}}}$
2. Find the limit $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(n^{14} - 2)}{\sqrt{n^2 + n^{12}}}$

Fig. 6. The generated result

References:

1. Губаль, Г. М. (2013). LATEX як видавнича система для створення математичних текстів і для програмування. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, 12, 23-26.
2. Губаль, Г. М. (2013). Стратегії для створення математичної статті у видавничій системі LATEX. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, 13, 10-13.
3. Губаль, Г. М. (2013). Анімація в математичних текстах на мові LATEX. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, 11, 11-15.
4. Губаль, Г. М. (2014). Особливості створення інтерактивних математичних тестів у видавничій системі LATEX. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, 15, 9-13.
5. Hubal, H. M. (2018). Mathematical texts and figures in the LaTeX system. Computer Integrated Technologies: Education, Science, Production, 32, 90-94.
6. Hubal, H. M. (2023). Improvement of references and footnotes in mathematical and other texts by creating macros in the LaTeX programming language. International Journal on Information Technologies & Security, 15(3), 15–22.
7. Griffiths, D. F., & Higham, D. J. (2016). Learning LaTeX. Society for Industrial and Applied Mathematics.
8. Gubal', G. N., & Stashenko, M. A. (2005). Improvement of an estimate of the global existence theorem for solutions of the Bogoliubov equations. Theoretical and mathematical physics, 145, 1736-1740.
9. Stashenko, M. A., & Gubal', G. N. (2006). Existence theorems for the initial value problem for the Bogolyubov chain of equations in the space of sequences of bounded functions. Siberian Mathematical Journal, 47, 152-168.
10. Gubal', G. N. (2014). On the existence of weak local in time solutions in the form of a cumulant expansion for a chain of Bogolyubov's equations of a one-dimensional symmetric particle system. Journal of Mathematical Sciences, 199, 654-666.
11. Hubal, H.M. (2016). The convergence of the series of the solution of the cauchy problem for the bbgky hierarchy of equations in many-kind particle systems. International Journal of Pure and Applied Mathematics, 108(4), 957–965.
12. Hubal, H. (2021). Mathematical modeling of biochemical processes rates in biological systems. Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production, 42, 43-49.
13. Hubal, H. M. (2025). Mathematical investigation of change in the size of a cancerous tumour when its cells are being destroyed by T-lymphocytes. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 28(4), 1429-1435.
14. Gryshchenko, T.V., Deineko, Zh.V., & Nikitenko, O.M. (2019). Using the LaTeX system during the preparation of scientific publications. IV International Scientific and Technical Conference "Print, Multimedia & Web", 96–98.
15. Athaya, H., Nadir, R. D. A., Indra Sensuse, D., Kautsarina, K., & Suryono, R. R. (2021, September). Moodle implementation for e-learning: A systematic review. In Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (pp. 106-112).
16. da Silva Fontes, A., da Costa, E. F., da Silva, D. F., & Rodrigues, O. (2021). Contribuições para o ensino: plataforma Moodle, 13(2).
17. Gamage, S. H., Ayres, J. R., & Behrend, M. B. (2022). A systematic review on trends in using Moodle for teaching and learning. International journal of STEM education, 9(1), 9.
18. Morze, N., Varchenko-Trotsenko, L., Terletska, T., & Smyrnova-Trybulska, E. (2021, March). Implementation of adaptive learning at higher education institutions by means of Moodle LMS. In Journal of physics: Conference series (Vol. 1840, No. 1, p. 012062). IOP Publishing.
19. Biggs, J., & Tang, C. (2011). Teaching for quality learning at university (4th ed.). Open University Press.
20. Pakhotin, K. K. (2005). Quality of education as the intellectual face of the state. Higher Education of Ukraine, 4, 78–84.
21. Lode, C. (2019). Better books with LaTeX the agile way. Clements Lode Verlag E.K. (254 p.).
22. Kottwitz, S. (2023). LaTeX graphics with TikZ. Packt Publishing, USA, (304 p.).
23. Kottwitz, S. (2026). LaTeX beginner's guide. Packt Publishing, USA, (410 p.).

24. Lamport, L. (1994). *LaTeX: a document preparation system*. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley. (272 p.).
25. Bless, C., Baimuratov, I., & Karras, O. (2023, June). SciKGT_EX: a LaTeX package to semantically annotate contributions in scientific publications. In *2023 ACM/IEEE Joint Conference on Digital Libraries (JCDL)* (pp. 155-164). IEEE.
26. Martin, L., & Henrich, A. (2024). RDF_{tex} in-depth: Knowledge exchange between LaTeX-based research publications and Scientific Knowledge Graphs. *International Journal on Digital Libraries*, 25(3), 517–535.
27. Aquib, M. (2026). *Fundamentals of LaTeX* (University Texts in the Mathematical Sciences). Springer Singapore.
28. Fan, L., & Liu, L. (2018). Application of LaTeX in teaching and scientific research for chinese under international environment. *Frontiers in Educational Research*, 1(1).
29. Lotey, E. K., Ofosua, B., Bonyah, E., & Boateng, F. O. (2025). Exploring LaTeX adoption: Verifying university students' intentions from a professional development perspective. *Social Sciences & Humanities Open*, 12, 102257.
30. Öchsner, M., & Öchsner, A. (2021). *Advanced LaTeX in Academia*. Springer International Publishing.
31. Rawan, S. (2025). From Code to Document: LaTeX Typesetting With Examples And Robust Referencing. *Journal of Science and Technological Researches*, 7(3), 1–6.
32. Rini, N., Marianti, A., & Rahayuningsih, M. (2024). Development of latex book template for submitting assignments to support paperless movement. *Jurnal IPA & Pembelajaran IPA*, 8(3), 237-248.
33. Sangha, S. S., & Walz, A. R. (2025). Transforming LaTeX to Accessible and Inclusive Formats: A Guide for Open Educational Resources. *Journal of Open Educational Resources in Higher Education*, 3(3).
34. Sarkar, D. (2021, August). Introducing LaTeX to the Academic Researcher: Engineering Writing with a Difference (RESUBMISSION). In *2021 First-Year Engineering Experience*.
35. ten Brinke, W., Griepsma, B., Ignatovič, A., & Zaytsev, V. (2025). On the structuring of LaTeX projects. Retrieved from <https://benevol2025.github.io/pre/paper10.pdf>
36. Wihardjo, E., Fatahillah, A., Hussien, S., & Monalisa, L. A. (2024). Comparative Study of Text Editors for Scientific Paper Writing with Mathematical Notation. *Journal of Digital Literacy and Volunteering*, 2(2), 97-102.

Reviewer: S.A. Fedosov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Department of Physics and Higher Mathematics, Lutsk National Technical University

Дата надходження статті до видання: 07.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

О.П. Чигвінцева^[0000-0002-9091-7482], І.В. Рула^[0000-0003-4229-6463], Ю.В. Бойко^[0000-0003-2850-0173]

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

НОВИЙ ОРГАНОПЛАСТИК НА ОСНОВІ ФЕНІЛОНУ С-2

Вивчено теплофізичні, фізико-механічні і трибологічні властивості органопластику на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2, армованого арамідним волокном терлон. Встановлено, що армування поліамідного в'язучого волокнистим наповнювачем у кількості 15 мас. % дозволило знизити питому теплосмність полімеру на 30-54% і підвищити його теплопровідність з одночасним зростанням міцнісних характеристик. Показано, що розроблений органопластик має антифрикційні властивості зберігаючи в умовах усіх досліджених режимів експлуатації низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість, що дозволило рекомендувати його до застосування як пластик конструкційного призначення для вузлів тертя машин і механізмів.

Ключові слова: ароматичний поліамід, фенілон С-2, арамідне волокно, органопластик, теплофізичні властивості, міцнісні показники, коефіцієнт тертя, зносостійкість, пластик конструкційного призначення

O.P. Chigvintseva, I.V. Rula, Ju.V. Boyko

NEW ORGANOPLASTIC BASED ON PHENYLON C-2

The thermophysical, physico-mechanical and tribological properties of organoplastics based on aromatic polyamide phenylone C-2 reinforced with aramid fiber Terlon were investigated. It was established that reinforcement of the polyamide binder with a fibrous filler in an amount of 15 wt.% made it possible to reduce the specific heat capacity of the polymer by 30–54% and to increase its thermal conductivity, accompanied by a simultaneous improvement in strength characteristics. It was shown that the developed organoplastic exhibits antifriction properties, maintaining a low coefficient of friction and high wear resistance under all investigated operating regimes, which makes it suitable for recommendation as a structural plastic for friction units of machines and mechanisms.

Keywords: aromatic polyamide, phenylone C-2, aramid fiber, organoplastic, thermophysical properties, strength indicators, coefficient of friction, wear resistance, structural plastic

Останнім часом з метою створення нових полімерних композитів конструкційного призначення широкого застосування отримали ароматичні поліаміди, до яких належить фенілон С-2. Цей пластик відрізняється високою робочою теплостійкістю (270°C), хімічною інертністю до більшості органічних розчинників, високою міцністю, зносостійкістю, стійкістю до ударних навантажень, а також гарними тепло- та морозостійкістю. За комплексом фізико-механічних властивостей фенілон С-2 може конкурувати із склопластиками, причому його цінні властивості здатні зберігатися в інтервалі температур від -70 до +250°C.

Оскільки серед конструкційних матеріалів ароматичні поліаміди характеризуються доволі невисокими значеннями тепло- і температуропровідності, це сприяє накопиченню тепла в робочих органах і рухомих з'єднаннях під впливом механічних навантажень, що у багатьох випадках призводить до розвитку деструкційних процесів, які викликають катастрофічний знос виробів із них. Гарний ефект поліпшення властивостей поліамідних композитів досягається при використанні як армуючого наповнювача арамідного волокна марки терлон, яке має здатність експлуатуватися в широкому температурному інтервалі, відрізняється високими термо- і тепло-стійкістю, питомою міцністю на розрив, низькою термічною усадкою, завдяки чому широко застосовується як конструкційний армуючий матеріал в різноманітних виробках технічного призначення. Унікальні характеристики арамідного волокна терлон пояснюються комбінацією жорстких молекул полімеру зі строго орієнтованими кристалами, а також сильною взаємодією між ланцюгами полімеру, що створені водневими зв'язками. Відомо, що арамід складається із бензольних кілець, з'єднаних один з одним через групу –NH–CO–, отже, між водневими і кисневими фрагментами сусідніх молекул утворюються міцні міжмолекулярні зв'язки, що забезпечує підвищену хімічну, механічну і термічну міцність волокна.

З метою створення нового органопластика (ОП) з покращеним комплексом експлуатаційних характеристик, ароматичний поліамід фенілон С-2 армували арамідним волокном марки терлон у кількості 15 мас. %. Композит отримували "сухим" способом, який полягав у змішуванні компонентів в електромагнітному полі, що обертається. Для цього в реактор завантажували порошкоподібний полімер, арамідне волокно і нерівновісні феромагнітні частинки. Під впливом електромагнітного поля, що обертається, феромагнітні частинки інтенсивно оберталися, стикаючись між собою, що забезпечило рівномірний і хаотичний розподіл арамідного волокна у полімерній матриці.

© О.П. Чигвінцева, І.В. Рула, Ю.В. Бойко

Вивчення теплофізичних характеристик полімерних композитів є однією із необхідних умов визначення їх технологічних і експлуатаційних властивостей, а також режимів експлуатації виробів із них. Порівняльний аналіз даних проведених теплофізичних досліджень свідчив про те, що армування фенілону С-2 арамідним волокном дозволило знизити його питому теплоємність на 30-54% (рис. 1а). Зокрема, в дослідженому температурному інтервалі (323-623 К) теплоємність фенілону С-2 знаходилась в межах 0,86-1,66 кДж/кг · К, в той час як для ОП вона змінювалась з підвищенням температури від 0,6 до 0,77 кДж/кг · К. Поряд з цим, спостерігалось зростання коефіцієнта теплопровідності (рис. 1б) полімерного в'язучого, що позитивно вплинуло на зміну його трибологічних властивостей, оскільки забезпечувало покращений тепловідвід із зони тертя зразків обумовлюючи стабільний енергетичний стан трибосистеми.

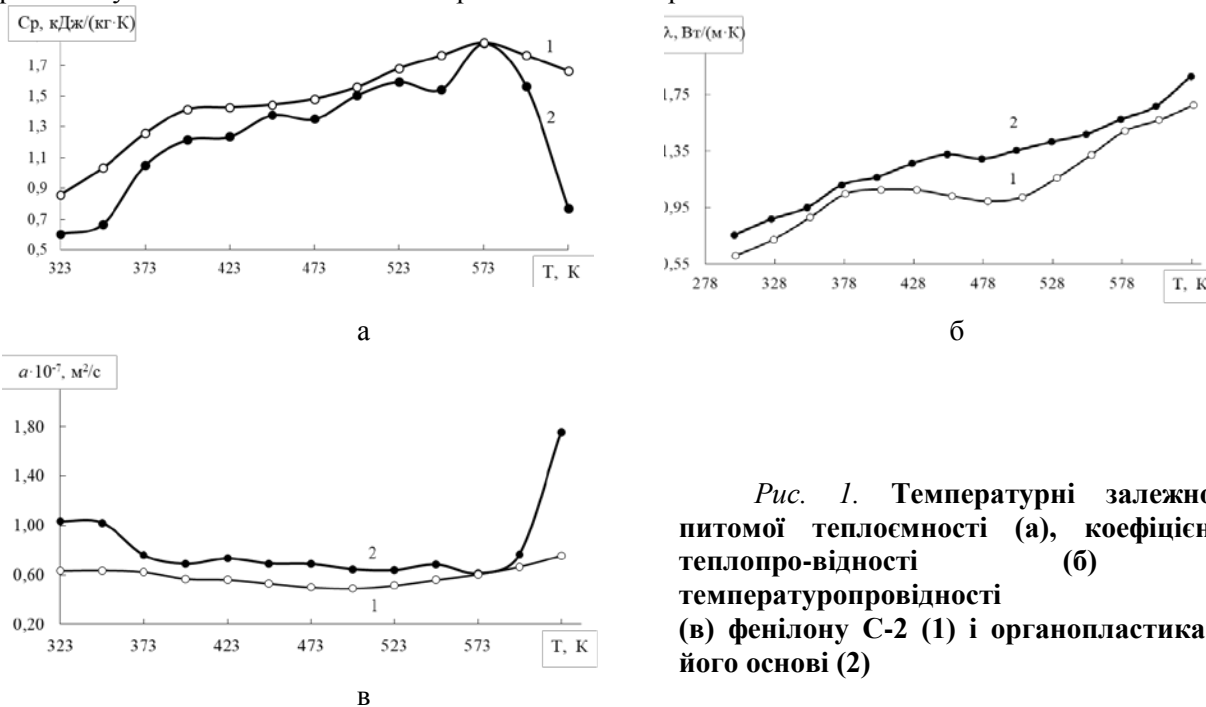


Рис. 1. Температурні залежності питомої теплоємності (а), коефіцієнтів теплопро-відності (б) і температуропровідності (в) фенілону С-2 (1) і органопластика на його основі (2)

Розроблений ОП мав також покращені фізико-механічні властивості (табл. 1). Зокрема, спостерігалось зростання мікротвердості, модуля пружності і межі текучості при стисненні ОП у порівнянні із вихідним полімером.

Табл. 1.

Фізико-механічні властивості фенілону С-2 і органопластика на його основі

Властивості	Матеріал	Фенілон С-2	С-2 + 15% терлону
Мікротвердість		36,07	50,03
Межа текучості при стисненні, МПа		215,3	250,1
Модуль пружності, МПа		3273,9	3855,0
Відносна деформація при стисненні, %		13,17	10,63

Трибологічні властивості композиту суттєво залежали від експлуатаційних параметрів: мінімальний коефіцієнт тертя в усьому дослідженому інтервалі навантажень мали зразки, для яких здійснювалось тертя по сталюму контртілу в умовах швидкості ковзання $v = 1,5$ м/с (рис. 2а, крива 2), однак їх зносостійкість різко зменшувалась при навантаженні $P = 0,8$ МПа.

В умовах тертя за максимальної швидкості ковзання ($v = 2,0$ м/с) коефіцієнт тертя різко зростав з посиленням навантажувального режиму, а зразки катастрофічно стиралися (рис. 2а і б, крива 3). При цьому інтенсивність лінійного зношування збільшилась від 0,68 до $15,1 \cdot 10^{-8}$, а матеріал зберігав свою працездатність до навантаження $P = 0,5$ МПа.

В умовах жорстких режимів експлуатації на поверхні контртіла розвивалась підвищена температура, що призвело до збільшення адгезії між поверхнями, що труться, і як наслідок – до суттєвого підвищення інтенсивності лінійного зношування.

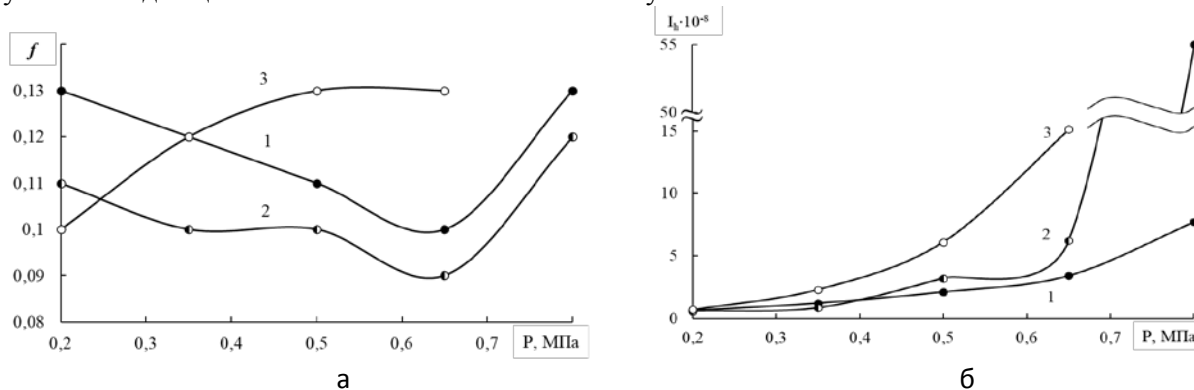


Рис. 2. Вплив питомого навантаження на коефіцієнт тертя (а) і інтенсивність лінійного зношування (б) зразків органопластику, досліджених в умовах тертя без змащування в умовах швидкостей ковзання 1 (1), 1,5 (2) і 2,0 м/с (3)

Слід зазначити, що зношування зразків ОП відбувалось внаслідок втомлювального механізму руйнування: в процесі зовнішнього тертя спостерігалось багаторазове деформування полімеру в окремих місцях фрикційного контакту, що призводило до руйнування та подальшого відділення матеріалу. За мінімальної швидкості ковзання ($v = 1,0$ м/с) зразки ОП стабільно працювали в усьому дослідженому інтервалі навантажень маючи низькі значення коефіцієнта тертя (0,10-0,13) і інтенсивності лінійного зношування ($I_h = 0,6-7,7 \cdot 10^{-8}$).

В результаті трибологічних досліджень встановлено, що розроблений ОП мав більш низькі значення коефіцієнта тертя порівняно із вихідним полімером, для якого вказаний показник знаходився в межах 0,21-0,17 в залежності від умов експлуатації. Як і для чистого фенілону С-2, для ОП кращими умовами для стабільної роботи були навантаження до $P = 0,8$ МПа (при $v = 1,5$ м/с) та до $P = 0,65$ МПа (при $v = 2,0$ м/с) [1-3].

Отже, в цілому, слід зазначити, що розроблений полімерний композит на основі фенілону С-2 і арамідного волокна терлон має покращені антифрикційні властивості зберігаючи низький коефіцієнт тертя ($f = 0,09-0,13$) та високу зносостійкість (інтенсивність лінійного зношування $I_h = 1,2-7,7 \cdot 10^{-8}$), що дозволило його рекомендувати до застосування як пластик конструкційного призначення для вузлів тертя машин і механізмів.

Список використаних джерел:

1. Чигвінцева О.П., Бойко Ю.В. Дослідження властивостей фенілону С-2 // VII International scientific and practical conference. «Scientific practice: modern and classical research methods» Boston, February 14, 2025. Boston-Vinnitsia: Primedia eLaunch & UKRLOGOS Group LLC, P. 160-161.

2. Чигвінцева О.П., Рула І.В., Бойко Ю.В. Дослідження властивостей ароматичного поліаміду фенілон С-2 // Матеріали IV Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів ТАСХ-2025», 20 травня 2025 р., м. Дніпро: «Середняк Т.К.», С. 36-38.

3. Чигвінцева О.П., Рула І.В., Бойко Ю.В. Дослідження властивостей ароматичного поліаміду фенілон С-2 // Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки», Луцьк, 2025, №82, С. 46-50.

Рецензенти:

Олексій ДЕРКАЧ, завідувач кафедру експлуатації машинно-тракторного парку Дніпровського державного аграрно-економічного університету, к.т.н., доцент

Олег КАБАТ, завідувач кафедру інноваційної інженерії ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій, д.т.н., професор

Дата надходження статті до видання: 10.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

М.В. Романенко^[0009-0006-8803-2278], О.Д. Кагляк^[0000-0002-5602-543X], В.В. Романенко^[0000-0003-1918-7090]*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГАЗОЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПОТУЖНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЗА ПОВНОФАКТОРНИМ ЕКСПЕРИМЕНТОМ**

Розглянуто та вирішено задачу створення спрощених математичних моделей у формі регресійних рівнянь, призначених для визначення оптимальних швидкостей газолазерного різання маловуглецевих і нержавіючих сталей різної товщини при роботі на лазерних установках потужністю до 6 кВт. Аналіз побудованих моделей показав набір факторів, що найбільше впливають на оптимальну швидкість різання таких сталей. Результати розрахунків подано у вигляді таблиці, що дає можливість визначити режими різання листів товщиною від 3 до 12 мм.

Ключові слова: лазер, газолазерне різання, маловуглецева та нержавіюча сталь, оптимальна швидкість різання, математична регресійна модель.

M.V. Romanenko, O.D. Kagiak, V.V. Romanenko

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF GAS LASER CUTTING OF STRUCTURAL MATERIALS WITH POWERFUL RADIATION IN MODELING BY FULL-FACTOR EXPERIMENT

Considered and resolved the problem of creating simplified mathematical models in the form of regression equations used to determine the optimal speeds for gas laser cutting of low-carbon and stainless steels of various thicknesses when operating on laser equipment with a power of up to 6 kW. The aim of the research was to determine the influence of key technological parameters of the gas laser cutting process on the choice of the optimal processing speed for steel sheets with different thicknesses in the conditions of multifactorial experiments. As a result of these experiments, regression mathematical models of the gas laser cutting process for low-carbon and stainless steels were obtained, confirming the possibility of achieving high cutting productivity with simultaneous ensuring of the proper quality of the processed edges. For practical convenience of use, the results of calculations of optimal cutting speeds for low-carbon and stainless steels depending on the studied technological parameters are presented in the form of a table, which makes it possible to quickly and conveniently determine the regimes of gas laser cutting of sheets with a thickness of 3 to 12 mm.

Keywords: laser, gas laser cutting, low-carbon and stainless steel, optimal cutting speed, mathematical regression model.

Постановка проблеми. Попри численні переваги застосування спеціалізованого обладнання, все ж тривають спроби створення та впровадження універсальних інструментів. Одним із можливих рішень є використання одного й того ж лазера в різних технологічних операціях. Попит на багатофункціональний і гнучкий інструмент відкриває для лазерів значні перспективи [1]. Водночас провідні позиції й надалі утримує лазерне різання, на яке припадає 41% застосування лазерного обладнання [2,3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останній час широке застосування отримали волоконні лазери, що відзначаються високою якістю променя та створюють нові можливості обробки, які раніше залишалися недосяжними при роботі з традиційними газовим та твердотільними лазерами. Сьогодні більшість випромінювачів волоконних лазерів працюють як із фіксованими характеристиками променя, так і з використанням зум-оптики чи дорогих фокусуєчих головок, що дає можливість компромісних рішень у виробничих процесах, де враховується різноманітність матеріалів, товщин та технологій [4].

У сфері лазерних технологій різання за останні роки спостерігається широке використання потужності лазерних джерел в 2–6 кВт. Це зокрема характерно для продукції відомих виробників, таких як Bystronic, BLM Group, Bodor, Trumpf, Amada, Mazak, Prima Power та інших. Поряд із підвищенням продуктивності зросла і максимальна товщина сталей з 3 до 15 мм, які успішно розрізаються такими лазерами, що досить важливо, адже на такий діапазон товщин припадає основний обсяг металообробки. Лазерне різання, яке довгий час займало провідні позиції лише в сегменті тонких листів, нині активно витісняє плазмове різання у сфері середніх товщин. Водночас зі збільшенням швидкості різання особливої актуальності набуває автоматизація допоміжних процесів: завантаження й розвантаження, зберігання заготовок та готових деталей. При цьому важливо, щоб продуктивність лазерної установки відповідала загальній ефективності виробничої лінії.

Різання конструкційних сталей, до категорії яких, в першу чергу, відносяться маловуглецеві та нержавіючі сталі, виконується при співвісній подачі робочого (асистуючого) газу в зону обробки, коли реалізується процес газолазерного різання (ГЛР). При розкрою конструкційних сталей в якості

асистуючого газу в основному застосовується кисень, стиснене повітря чи азот. Під час ГЛР в середовищі кисню або стисненого повітря внаслідок екзотермічної реакції горіння металу на крайках різу утворюються оксидні нашарування, які згодом необхідно видаляти відповідно до технологічних вимог. Використання азоту є хоч і дорожчим, але більш вигідним варіантом, оскільки дозволяє зменшити потребу в додатковій обробці та отримати готову деталь, придатну для нанесення фарби, порошкового покриття чи зварювання. Такий спосіб розкрою металу має назву «прем'єр» різання. Застосування азоту особливо доцільне для користувачів, яким потрібне просте рішення для запобігання окисленню під час різання, в першу чергу, нержавіючих сталей і які висувають підвищені вимоги до якісних параметрів різу. Крім того, високу якість різання волоконним лазером можна отримати, якщо до азоту додавати кисень. Це додатково підвищує подальшу зварюваність деталей та можливість нанесення порошкового покриття або фарби на вирізани заготовки [5,6].

На відміну від ріжучих головок малопотужних лазерів фокусуєча система лазерів потужністю до 6 кВт повинна мати більш широкий діапазон регулювання положення фокальної площини оптичного перетворюючого елемента лазерного випромінювання. Завдяки цьому одну лазерну головку можна використовувати як універсальне рішення для завдань, що потребують реалізації широкого діапазону швидкостей різання [7,8].

В останній час деякі з компаній, наприклад, фірма Trumpf, займаються впровадженням штучного інтелекту (ШІ) у процеси лазерної обробки, щоб розширити межі можливостей лазерних машин за рахунок не тільки повної їх автоматизації, а й можливості самонавчання такого обладнання. Автоматизовані лазерні системи — лише один із прикладів застосування ШІ. Крім цього, компанія Trumpf розробила рішення для заміни запасних частин лазерного обладнання, що працює завдяки штучній нейронній мережі, яку Trumpf наповнює зображеннями різних компонентів, доступних для замовлення [9].

Щоб забезпечити стабільну якість вирізання деталей та високу ефективність процесу лазерного різання, необхідно вміти обирати оптимальні параметри його реалізації. Саме вони визначають властивості готових виробів, що проявляється у рівні шорсткості поверхні різу, величині ширини прорізу та зони термічного впливу на крайках вирізаної деталі. Для реалізації таких задач в останній час почав застосовуватися метод Тагучі [10], який набуває все більшого широкого застосування у технічних галузях. Такий метод являє собою статистичний підхід, спрямований на покращення якості виготовлення деталей. Сутність цього методу полягає у використанні системного й водночас доволі простого підходу до оптимізації виробничої продуктивності. Головна його мета — підвищення якості продукції незалежно від сфери використання, а також зменшення варіацій у процесах і досягнення стабільних показників ефективності [11].

Постановка завдань. Таким чином, розробка алгоритмів технологічного забезпечення процесів ГЛР сталевих листів із конструкційних металів є актуальною проблемою. Її вирішення дасть можливість отримати математичні моделі для розрахунку оптимальних швидкостей ГЛР таких конструкційних матеріалів як маловуглецеві та нержавіючі сталі різної товщини на лазерному обладнанні потужністю до 6 кВт. Для цього потрібне більш широке вивчення впливу технологічних параметрів, в першу чергу, на розмірні та якісні показники ГЛР конструкційних металів. В подальшому отримані моделі можуть відкрити шляхи реалізації процедури пошуку оптимальних режимів ГЛР різних сталевих матеріалів в реальному виробництві.

Методи та методики дослідження. Найвищої якості поверхні різу можна досягти, виконуючи різання на максимально можливій швидкості, яка ще забезпечує наскрізне прорізання металевих листів певної товщини. Таку швидкість доцільно вважати оптимальною. У праці [12] було представлено методику, суть якої полягала в поступовому ступінчастому збільшенні швидкості різання до того моменту, коли проріз матеріалу заданої товщини ставав неповним. Останнє значення швидкості, за якого ще досягалося наскрізне різання, вважалося оптимальним для заготовки відповідної товщини. Крім того, нами розглядалася можливість виконувати різання заготовки зі змінною швидкістю. Спочатку встановлюють значення швидкості, при якому гарантовано отримуємо повний проріз матеріалу. В подальшому швидкість поступово та безперервно збільшують до моменту, коли наскрізне різання вже не забезпечується. Будемо вважати, що та швидкість, яка на 10 % менша швидкості, коли припиняється повне прорізання, приймається за її оптимальне значення для даної товщини заготовки.

Всі ці методи забезпечують досить точне встановлення шуканої величини швидкості, але реалізація їх на реальному лазерному обладнанні веде до виходу його з ладу в результаті пошкодження оптичної системи лазера. Таке руйнування оптики відбувається тому, що при ненаскрізнному прорізанні металу продукти руйнування з порожнини різку вилітають не вниз, а завертаються наверх та через сопло можуть потрапити на захисне скло. При високій потужності лазера є висока ймовірність, що захисне скло може розтріскатися та зруйнуватися. Мають місце й випадки, коли продукти руйнування можуть долетіти й до фокусувальної лінзи та привести її в непридатність, що в сумі призведе до великих матеріальних затрат та значного часу на ремонт.

Тому нами була застосована наступна методика підбору оптимальної швидкості різання необхідної товщини сталі на заданих режимах ГЛР. Всі виробники лазерного обладнання комплектують супровідну документацію для свого обладнання широким набором таблиць з можливими режимами ГЛР на максимально дозволених швидкостях. Серед цих таблиць легко підібрати такі режими, які б відповідали нашим потребам для отримання математичних моделей, що розробляються нами. Побудова ж моделей дає можливість отримання більш широкого діапазону таких режимів та можливість прогнозування їх застосування для широкого діапазону лазерного обладнання різної потужності. В подальшому експерименти на підібраних режимах виконувалися на нашому обладнанні та отримані різки аналізувалися на їх відповідність до задовільної якості. Таким підходом ми отримували оптимальні швидкості різання на заданих параметрах ГЛР та уникали можливості псування лазерного обладнання.

Викладення основного матеріалу. Аналіз існуючих теоретичних моделей газолазерного різання металічних матеріалів, показав, що на даному етапі відсутні розрахункові залежності, які з достатньою точністю описують взаємозв'язок між технологічними параметрами процесу та розмірними характеристиками отриманих різів. Теоретичні підходи, що базуються на фізичних закономірностях процесу, здебільшого забезпечують лише якісний збіг розрахункових даних з експериментальними результатами й можуть застосовуватися переважно для попередніх оцінок та розрахунків.

Для кількісної оцінки впливу різних факторів на показники отриманих розрізів експерименти можуть виконуватися як у форматі однофакторних, так і багатфакторних досліджень. Нині при дослідженні технологічних процесів з метою опису об'єкту дослідження, тобто для знаходження моделей, які більш точно описують вплив технологічних факторів ГЛР на оптимальні показники різання, все ширше застосовуються експериментально-статистичні методи [13–14]. Проведення багатфакторних експериментів на тих технологічних факторах, що суттєво визначають перебіг процесу ГЛР, дає змогу побудувати математичні регресійні моделі даного процесу. Такі моделі можна використовувати як для опису об'єкту дослідження, так і для подальшого аналізу впливу технологічних чинників на оптимальні показники ГЛР.

При опису процесу обробки статистичними методами математична модель для знаходження параметрів процесу ГЛР (y) в загальному вигляді може бути представлена у вигляді рівняння [14]:

$$y = f(\beta_0, \beta_1 \dots \beta_K; x_1, x_2, \dots x_K), \quad (1)$$

де $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_K$ – шукані параметри моделі (коефіцієнти регресії); $x_1, x_2, \dots x_K$ – незалежні керовані змінні.

Для отримання розрахункових параметрів математичної моделі існують різні методи. У регресійному аналізі найбільш широке поширення отримав метод найменших квадратів. При цьому на підставі апріорної інформації, визначають тип теоретичної кривої, потім знаходять її параметри. Для встановлення правильності опису процесів різання рівняннями регресії був виконаний статистичний аналіз отриманих регресійних моделей [14]. Можливе виконання розрахунків коефіцієнтів рівнянь регресії та проведення статистичного аналізу отриманих регресійних моделей при використанні Excel-таблиць.

Попередні експерименти, описані в літературних джерелах [15], дозволили встановити, що найбільш суттєвими чинниками, що впливають на підбір оптимальної швидкості різання при ГЛР конструкційних матеріалів таких, як маловуглецева та нержавіюча сталь, є товщина листа сталі H , потужність лазерного випромінювання P та тиск асистуючого газу p , що подається в зону різання. Існують також інші технологічні фактори, що впливають на оптимальну швидкість ГЛР такі, як величина та напрямок розфокусування сфокусованого лазерного променя по відношенню до поверхні заготовки, що розрізається, та вид асистуючого робочого газу, але, щоб не ускладнювати

отримані нами регресійні моделі, ці параметри в кожному конкретному випадку краще фіксувати на оптимальних значеннях, які будуть приведені нижче. Для встановлення цих оптимальних значень перерахованих другорядних параметрів повністю підходить згаданий нами вище набір таблиць від виробників лазерного обладнання з можливими режимами ГЛР на максимально дозволених швидкостях. На підставі цих таблиць була визначена також область зміни вибраних суттєвих факторів ГЛР, які в подальшому, як прийнято в регресійному аналізі, будемо називати незалежними змінними та встановлені рівні і інтервали варіювання для кожного такого фактору відповідно для маловуглецевих та нержавіючих сталей (табл. 1). Фіксовані значення інших параметрів ГЛР приведені під табл. 1.

Табл. 1.

Рівні та інтервали варіювання досліджуваних факторів та фіксовані значення деяких другорядних технологічних параметрів* при ГЛР маловуглецевих та нержавіючих сталей

Досліджувані фактори Рівні варіювання	Маловуглецева сталь			Нержавіюча сталь		
	Н, мм	Р, кВт	р, МПа	Н, мм	Р, кВт	р, МПа
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
Зоряне плече (+ α^{**})	11,705	5,518	0,112	11,705	6,023	0,5103
Верхній рівень (+I)	10	4,7	0,095	10	5	0,425
Основний рівень (0)	7,5	3,5	0,07	7,5	3,5	0,3
Нижній рівень (-I)	5	2,3	0,045	5	2	0,175
Зоряне плече (- α)	3,295	1,482	0,028	3,295	0,977	0,0898
Інтервал варіювання	2,5	1,2	0,025	2,5	1,5	0,125

* для ГЛР вуглецевих сталей: асистуючий газ — кисень, величина та напрямок розфокусування — +4,5...+7,0 мм (в залежності від товщини заготовки), відстань від сопла до заготовки — 0,7...1,0 мм; для ГЛР нержавіючих сталей: асистуючий газ — стиснене повітря або азот, величина та напрямок розфокусування — 0...-2,5 мм (в залежності від товщини заготовки), відстань від сопла до заготовки — 0,5...0,8 мм.

** зіркове $\alpha = 1,682$.

Оскільки залежність швидкості газолазерного різання від обраних технологічних параметрів у загальному випадку має нелінійний характер [15], для опису регресійних рівнянь процесу в досліджуваній області факторів було застосовано квазі-D-оптимальний план другого порядку [14,16]. Робоча матриця цього плану для маловуглецевих та нержавіючих сталей наведена в табл. 2. Відповідно для кожної з цих сталей, значення \bar{y}_1 та \bar{y}_2 оптимальної швидкості ГЛР для кожної серії дослідів, наведені в табл. 2, отримані як середньо-арифметичне з двох величин, узятих із різних та раніше згаданих таблиць виробників.

Опрацювання експериментальних даних із використанням методів математичної статистики дало змогу отримати регресійні рівняння, які описують вплив зазначених технологічних факторів на величину оптимальної швидкості різання.

Обчислення коефіцієнтів цих рівнянь, а також статистичний аналіз побудованих моделей проводилися за допомогою Excel-таблиць. Підсумки статистичної обробки моделей регресії для маловуглецевих та нержавіючих сталей також наведені в табл. 2. Виходячи із даних цієї таблиці, встановлено, що отримані залежності коректно відображають процес ГЛР досліджуваних сталей та можуть бути ефективно використані на практиці.

Отримані регресійні моделі в кодованій шкалі виміру незалежних змінних мають наступний вигляд:

– для маловуглецевих сталей:

$$\hat{y}_1 = 1,975 - 0,559x_1 + 0,220x_2 + 0,121x_3 + 0,019x_{12} + 0,179x_1^2; \quad (2)$$

© М.В. Романенко, О.Д. Кагляк, В.В. Романенко

– для нержавіючих сталей:

$$\hat{y}_2 = 3,066 - 1,735x_1 + 1,702x_2 + 0,244x_3 - 0,231x_{12} + 0,381x_{13} + 0,797x_1^2; \quad (3)$$

Створені регресійні моделі процесу ГЛР конструкційних сталей можуть застосовуватися як для розв'язання прямого завдання — визначення оптимальної швидкості різання для заданої товщини металу, обраних потужності лазера та тиску асистуючого газу, так і для обчислень оберненого завдання — пошуку можливої товщини сталей, що розрізаються на наявному обладнанні та при заданій швидкості різання.

Табл. 2.

Звідна таблиця багатofакторного експерименту при обробці маловуглецевих та нержавіючих сталей.

№ досліду	Умови проведення дослідів			Результати експериментів і значення відгуку			
				Маловуглецева сталь		Нержавіюча сталь	
	x_1	x_2	x_3	\bar{y}_1	\hat{y}_1	\bar{y}_2	\hat{y}_2
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	-	-	-	2,3	2,399	3,45	3,794
2.	+	-	-	1,2	1,232	0,75	0,025
3.	-	+	-	2,85	2,051	7,75	7,649
4.	+	+	-	1,75	1,697	3,3	2,954
5.	-	-	+	2,6	2,616	3,1	3,507
6.	+	-	+	1,45	1,473	1,1	1,263
7.	-	+	+	3,1	3,031	6,6	7,386
8.	+	+	+	2,1	1,964	4,5	4,217
9.	+α	0	0	1,5	1,542	1,7	2,403
10.	-α	0	0	3,45	3,421	9,1	8,238

Продовження табл. 2.							
1	2	3	4	5	6	7	8
11.	0	+α	0	2,2	2,352	5,95	5,909
12.	0	-α	0	1,75	1,611	0,3	0,183
13.	0	0	+α	2,1	2,160	4,1	3,456
14.	0	0	-α	1,8	1,753	2,15	2,636
15.	0	0	0	2,05	1,975	3	3,066
16.	0	0	0	1,9	1,975	3,1	3,066
Статистичний аналіз адекватності моделей	Дисперсія похибки досліду			0,1178		0,1634	
	Дисперсія адекватн.			0,2108		0,3969	
	F- критерій (розрахун.)			1,789		2,429	
	F- критерій (табл.знач.)			2,657		2,538	

Для зручності використання представлені вище регресійні моделі, які приведені в кодованій системі вимірювання, були трансформовані у вигляді з коефіцієнтами в натуральній шкалі. Значення цих коефіцієнтів відображені в табл. 3.

Табл. 3.

Значенні коефіцієнтів регресійних моделей в натуральній шкалі виміру для маловуглецевих (y_1) та нержавіючих (y_2) сталей.

Моделі	Коефіцієнти рівнянь регресії в натуральній шкалі									
	\tilde{b}_0	\tilde{b}_1	\tilde{b}_2	\tilde{b}_3	\tilde{b}_{12}	\tilde{b}_{13}	\tilde{b}_{23}	\tilde{b}_1^2	\tilde{b}_2^2	\tilde{b}_3^2
y_1	4,516	-0,682	0,111	4,842	-	0,100	0,208	0,029	0,762	-10,548
y_2	3,066	-1,734	1,702	0,244	-0,231	0,381	-	0,797	-	-

Окрім подання отриманих результатів у вигляді рівнянь регресії, було здійснено їх графічну інтерпретацію у формі двовимірних перерізів трьох вимірних поверхонь, які описують кожну із моделей. Так, закономірності зміни оптимальної швидкості ГЛР залежно від технологічних параметрів в результаті обробки маловуглецевих сталей наведені на рис. 1 (а, в, д). Відповідно, ці ж результати для нержавіючої сталі представлені на рис. 1 (б, г, е). Всі значення технологічних факторів, які були використані для отримання відповідних графіків, вказані на кожному із

рисунків. Так, наприклад, приведені на рис. 1, а закономірності відображають двовимірні перерізи відповідних поверхонь відгуків для маловуглецевих сталей та встановлюють залежність оптимальної швидкості ГЛР від товщини сталі при різних значеннях потужності лазерного випромінювання в 2, 4 та 6 кВт для величини тиску робочого газу $p = 0,1$ МПа.

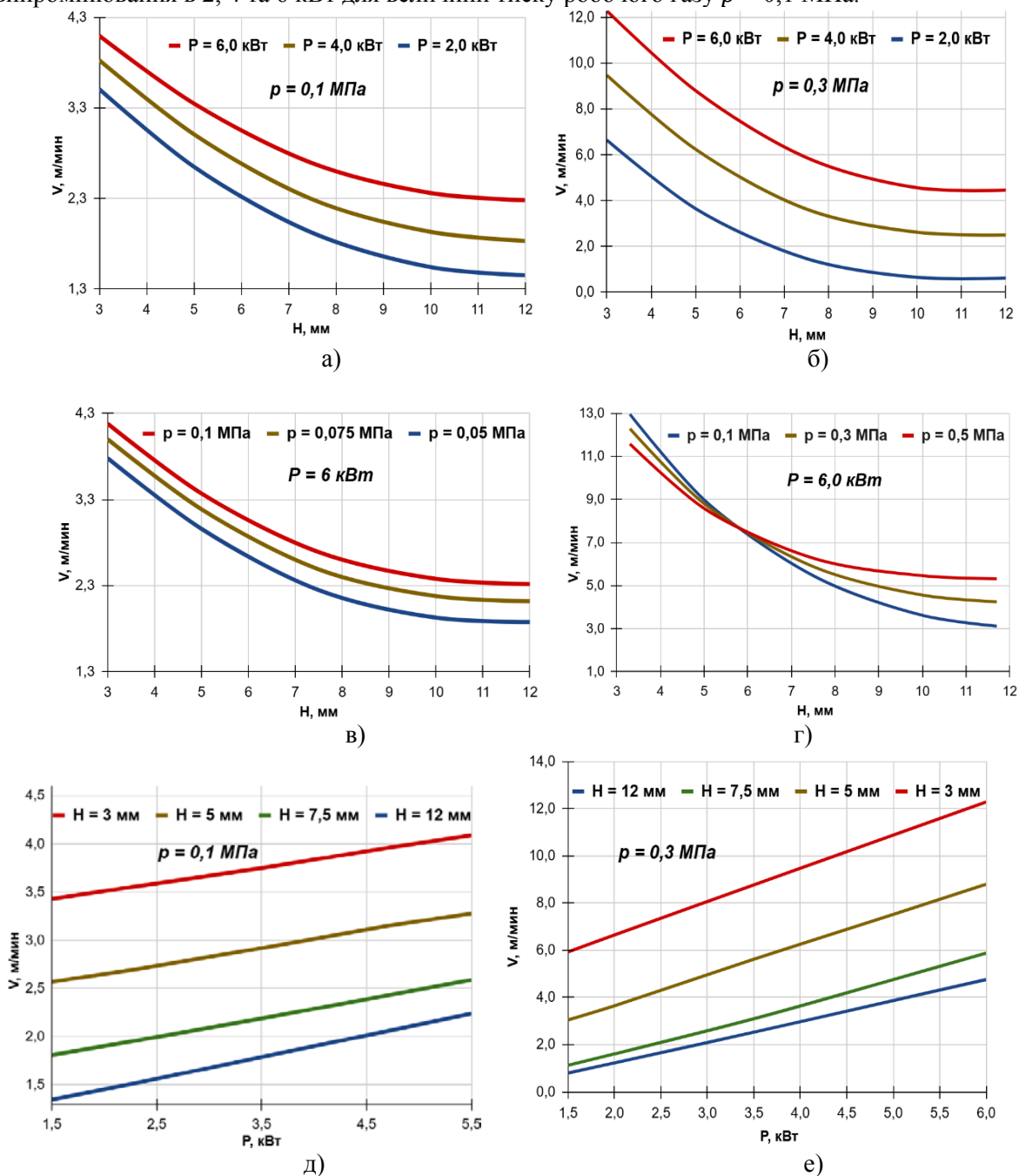


Рис. 1. Залежність оптимальної швидкості різі від приведених на графіках значеннях технологічних параметрів ГЛР для маловуглецевих (а, в, г) та нержавіючих сталей (б, г, е)

Аналіз отриманих двовимірних перерізів регресійних моделей свідчить, що під час різання маловуглецевих та нержавіючих сталей найбільш істотний вплив на оптимальну швидкість ГЛР має товщина металу, що підлягає розрізанню. Далі за значимістю йде потужність лазерного випромінювання, а потім — тиск асистуючого газу. При цьому швидкість різання різко зменшується зі збільшенням товщини сталі та більш помірно зростає при підвищенні потужності лазерного випромінювання та тиску робочого газу. Крім того, збільшення товщини листової маловуглецевої сталі у поєднанні з підвищенням потужності лазера спричиняє додаткове збільшення швидкості

обробки (рис. 1, а), що підтверджується позитивними коефіцієнтами при взаємодії цих факторів у рівнянні (2). Цей ефект неможливо було виявити при виконанні однофакторних експериментів.

Для нержавіючих сталей має місце більш суттєве зростання швидкості ГЛР при зменшенні товщини цієї сталі та підвищенні потужності лазера і тиску асистуючого газу. А ось ефект взаємодії між товщиною сталі та тиском робочого газу носить настільки істотний характер, що графіки залежності швидкості різання від товщини заготовки зі зміною тиску супроводжуючого газу перехрещуються (рис. 1, г). Це легко пояснити тим, що для тонколистових металів при збільшенні тиску газу значно зростає ефект охолодження металу цим газом.

Таким чином, при різанні маловуглецевих сталей 6 кВт лазером, не залежно від їх товщини, потрібно виконувати ГЛР на максимальних значеннях потужності лазерного випромінювання та тиску асистуючого кисню в якості робочого газу. В дослідженому нами діапазоні – це 0,1 МПа. При розрізанні ж нержавіючих сталей потужність випромінювання теж повинна бути максимальна, а ось тиск асистуючого газу (стисненого повітря чи азоту) буде залежати від товщини заготовки: для товщин від 3 до 6 мм – це 0,1 МПа, а від 7 до 12 мм – це 0,5 МПа. При цьому не потрібно забувати, що використання підвищеного тиску робочого газу веде до його більших витрат, що може бути економічно недоцільним.

Крім того, з аналізу рис. 1, д та рис. 1, е можна зробити висновок, що під час різання листів однакової товщини збільшення потужності лазерного випромінювання з 1,5 до 6,0 кВт забезпечує приріст швидкості обробки для маловуглецевих сталей в середньому на 30 %. При цьому зі зменшенням товщини розрізуваного матеріалу вплив потужності лазерного променя на продуктивність обробки стає більш відчутним. З огляду на те, що вартість лазерних установок істотно зростає зі збільшенням їх потужності, використання більш потужного обладнання для ГЛР маловуглецевих сталей не завжди є економічно виправданим. Дещо інакше цей аналіз виглядає для нержавіючих сталей, бо приведений вище приріст потужності випромінювання дає зростання швидкості різання більше, ніж в два рази, що виправдовує застосування більш потужного обладнання для ГЛР цих сталей.

На рис. 2, а та 2, б представлений вигляд різів, отриманих при ГЛР відповідно маловуглецевих та нержавіючих сталей для товщин, що відповідають (або близькі до них) рівням варіювання цього параметру в табл. 1.

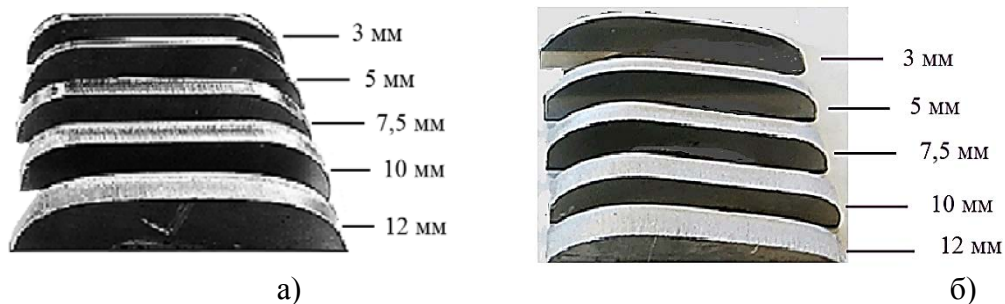


Рис. 2. Фото різів, отриманих в заготовках різної товщини в маловуглецевих (а) та нержавіючих (б) сталях

Для оцінки якості виконання процесу ГЛР в заготовках із маловуглецевої та нержавіючої сталі на рис. 3 приведені збільшені фото поверхні різів в заготовок товщиною 12 мм в цих сталях. Слід також відмітити, що різ в нержавіючій сталі відноситься до категорії так званих «прем'єр» різів та виконаний при використанні азоту в якості асистуючого газу.

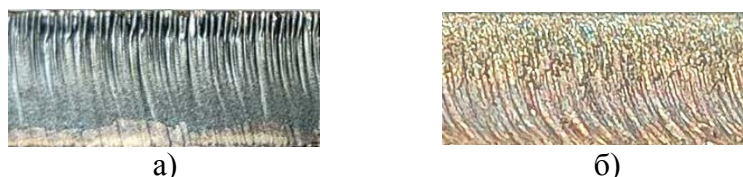


Рис. 3. Вигляд якісних різів, виконаних в сталі товщиною 12 мм в маловуглецевій (а) та нержавіючій (б) сталі.

Для широкого практичного використання основні результати розрахунків по встановленню оптимальної швидкості різання листових матеріалів із маловуглецевої та нержавіючої сталі в

залежності від досліджених технологічних факторів, які отримані по регресивним моделям, що описані залежностями (2) та (3), представлені в табл.4, завдяки якій є можливість зручно та швидко підбирати режими ГЛР названих сталей товщиною від 3 до 12 мм.

Табл. 4.

Режими різання маловуглецевих та нержавіючих сталей різної товщини лазерним випромінюванням заданої потужності при оптимальних значеннях інших технологічних факторів

Вид сталі	Потужність лазерного випромінювання, кВт	Товщина листа, мм	Розрахована оптимальна швидкість ГЛР, м/хв.
Маловуглецева*	2	3	3,51
		5	2,65
		8	1,72
		12	1,45
	4	3	3,83
		5	3,01
		8	2,10
		12	1,83
	6	3	4,10
		5	3,35
		8	2,50
		12	2,28
Нержавіюча**	2	3	6,64
		5	3,65
		8	1,10
		12	0,62
	4	3	9,47
		5	6,24
		8	3,32
		12	2,50
	6	3	12,28
		5	8,80
		8	5,50
		12	4,46

* – асистуючий газ – кисень при величині тиску в 0,1 МПа; величина та напрямок розфокусування – +4,5...+7,0 мм (в залежності від товщини заготовки); відстань від сопла до заготовки – 0,7...1,0 мм.

** – асистуючий газ – стиснене повітря або азот при величині тиску в 0,3 МПа; величина та напрямок розфокусування – 0...-2,5 мм (в залежності від товщини заготовки); відстань від сопла до заготовки – 0,5...0,8 мм.

В подальшому нами заплановане створення он-лайн калькулятора, який дозволить користувачу розв'язувати як пряму задачу – при введенні змінних параметрів різки (товщини заготовки, потужності лазерного випромінювання, тиску асистуючого газу) та запропонованих фіксованих значеннях інших режимів ГЛР отримувати необхідне значення потрібної швидкості різання, так і одне із зворотних завдань – наприклад, при заданій товщині заготовки та тиску робочого газу, а також потрібній швидкості різання розрахувати достатню потужність лазера для виконання такої операції ГЛР. Он-лайн калькулятор передбачатиме можливість розширення діапазону його застосування при введенні нових результатів регресійного аналізу процесу ГЛР, наприклад, для лазерного випромінювання в 20 кВт.

Висновки. Літературний аналіз показав, що розробка алгоритмів технологічного забезпечення процесів ГЛР сталевих листів з конструкційних металів дає змогу сформулювати

© М.В. Романенко, О.Д. Кагляк, В.В. Романенко

відносно прості математичні моделі, які дають змогу обчислювати оптимальні швидкості різання маловуглецевих і нержавіючих сталей товщиною від 3 до 12 мм на обладнанні потужністю до 6 кВт. Створені моделі у подальшому відкривають перспективи визначення оптимальних режимів ГЛР різних сталевих матеріалів у режимі реального часу.

Для визначення оптимальної швидкості різання залежно від ключових технологічних параметрів була застосована оригінальна методика, що ґрунтується на аналізі технічної документації виробників лазерного устаткування. Відібрані режими перевірялися шляхом експериментів на наявній лазерній установці, а отримані результати оцінювалися за критеріями якості різі.

У результаті багатофакторних досліджень були отримані регресійні математичні моделі процесу ГЛР для маловуглецевих і нержавіючих сталей. Їхній аналіз, а також розгляд двовимірних перерізів поверхонь, описуваних цими моделями, показав, що найбільш вагомим фактором для оптимальної швидкості різання є товщина заготовки. Другим параметром за значущістю є потужність лазерного випромінювання, а третім — тиск асистуючого газу. При цьому зі збільшенням товщини сталі (особливо нержавіючої) швидкість різання суттєво знижується, тоді як підвищення потужності лазера і тиску газу призводить до помірної її зростання.

Встановлено, що при обробці листів однакової товщини підвищення потужності випромінювання з 1,5 до 6,0 кВт збільшує швидкість різання маловуглецевих сталей в середньому лише на 30 %, тому застосування високопотужних лазерних установок для таких матеріалів не завжди є економічно доцільним. Для нержавіючих сталей цей же діапазон збільшення потужності забезпечує понад дворазове зростання швидкості різання, що повністю обґрунтовує використання потужнішого обладнання.

Для практичного застосування результати розрахунків, що визначають оптимальні швидкості різання листових матеріалів із маловуглецевої та нержавіючої сталей залежно від досліджених технологічних параметрів, подані у вигляді таблиці. Використання таблиці дозволяє швидко й зручно обирати режими газолазерного різання цих конструкційних сталей товщиною від 3 до 12 мм.

У перспективі планується створення он-лайн калькулятора, який дозволить, виходячи із введених параметрів різання (товщини листа, потужності лазерного випромінювання та тиску асистуючого газу), а також фіксованих додаткових умов ГЛР, оперативно отримувати розрахункові значення оптимальної швидкості різання в он-лайн режимі.

Список використаних джерел:

1. Graf T., Abdou Ahmed M., Berger P., Onuseit V., Weber R. THE LASER: One universal tool for manufacturing. *Industrial Laser Solutions*, 2019, January/February, 13–15.
2. Overton G., Noguee A., Belforte D., Wallace J., Gefvert B. What goes up. *Annual Laser Market Review & Forecast. Laser Focus World*, 2019, January, 40–65.
3. Belforte D. A. 2018 was another record year, contending with turmoil. *Industrial Laser Solutions*, 2019, January/February, 9–11.
4. Dahv A. V. KLINER, Roger L. Fiber laser has all-fiber tunable beam quality. *Laser Focus World*, 2021, April, 5–48.
5. Stanczyk N. Improving cutting speed and edge quality. *Industrial Laser Solutions*, September/October, 2018, 15–16.
6. Dustin D. How to select the right setup for your fiber laser cutting needs. *Industrial Laser Solutions*, September/October, 2018, 17–19.
7. Fiber laser technology improves metal cutting / Dahv Kliner, Brian Vict — nLIGHT, Vancouver, WA, www.nlight.net // *Industrial Laser Solutions*. 2018. September/October. P. 23–26.
8. Belforte D. Feasibility study tackles effective laser beam cutting underwater. *Industrial Laser Solutions*. March/April, 2019, 6.
9. Daum K. With these projects, TRUMPF is making artificial intelligence a reality // [url: https://www.trumpf.com/en_int/magazine/with-these-projects-trumpf-turns-ai-into-reality/10.07.2019](https://www.trumpf.com/en_int/magazine/with-these-projects-trumpf-turns-ai-into-reality/10.07.2019).
10. Bendell A. *Taguchi Methods*. Springer Dordrecht, 2009. – 212 p.
11. Соколан Ю., Клясний Н., Соколан К. Оптимізація режимів лазерного різання нержавіючої сталі методом Тагучі. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 1 (331), 2024, 364 – 369.

12. Alsaadawy M. et al. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 30, 1039–1074.
13. Літнарівич Р.М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу. Навчальний посібник, МЕНУ, Рівне, 2011.-140 с.
14. Radchenko S.G. Metodologija regressionnogo analiza [Methodology of regression analysis], Kornijchuk, Kyiv, 2011. – 376 p.
15. Kovalenko V.S. Romanenko V.V., Oleshchuk, L.M. Low-waste processes of laser beam cutting. Kyiv, Technika, 1987. – 112 p.
16. Лапач С.М. Проблеми побудови регресійних моделей процесів різання металів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування, 2014, 3 (72), 40–47.

Рецензент: Л.Ф. Головка, д.т.н., проф.

Дата надходження статті до видання: 12.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

М.Є. Чернова^[0000-0001-6014-3087]

НЕНЬЮТОНІВСЬКА ПРИРОДА БУРОВИХ РОЗЧИНІВ: ВІД В'ЯЗКОСТІ ДО ТИКСОТРОПІЇ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

У статті досліджено фізичну природу неньютонівської поведінки бурових промивальних систем. Розкрито механізми переходу від в'язкопластичного стану до тиксотропного відновлення структури з позиції енергії міжмолекулярної взаємодії. Автором обґрунтовано необхідність врахування релаксаційних ефектів при моделюванні гідравлічних процесів у глибоких свердловинах. Проаналізовано сучасні світові тенденції керування реологією розчинів у складних термобаричних умовах.

Ключові слова: реологія, буровий розчин, неньютонівська рідина, тиксотропія, напруження зсуву, в'язкість.

M.Je.Chernova

NON-NEWTONIAN NATURE OF DRILLING FLUIDS: FROM VISCOSITY TO THIXOTROPY

The paper presents a fundamental physical analysis of the rheological behavior of drilling fluids as complex disperse systems. Based on the principles of continuum mechanics, the author investigates the transition between viscoplastic flow and thixotropic structure recovery. The study highlights that conventional steady-state models, such as the Bingham-Plastic model, often neglect the time-dependent relaxation spectra, leading to significant errors in hydraulic pressure predictions for deep well construction.

Special attention is paid to the energetic nature of particle interactions within bentonite-polymer suspensions. By integrating recent findings from high-impact international journals (Category A), the author proposes a conceptual vision for "smart" drilling fluids with controlled rheological responses. The results demonstrate that effective hole cleaning and wellbore stability depend on the kinetic balance between shear-induced structure breakdown and Brownian-driven coagulation. The research outlines future perspectives for implementing digital twins in rheological monitoring.

Keywords: rheology, drilling fluids, non-Newtonian fluid, thixotropy, shear stress, yield point, HPHT conditions.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими й практичними завданнями. Сучасне буріння нафтових і газових свердловин — це процес, що відбувається в екстремальних фізичних умовах. Одним із ключових елементів цього процесу є буровий розчин, який часто називають «кров'ю» свердловини. Його головне завдання — не просто змачувати інструмент, а й підіймати на денну поверхню уламки гірської породи.

Метою даної роботи є теоретичне фізико-математичне обґрунтування взаємозв'язку між параметрами динамічної в'язкості та кінетикою тиксотропного структурування бурових розчинів. Основна увага приділяється аналізу неньютонівської поведінки систем у контексті енергії міжмолекулярної взаємодії дисперсної фази, що дозволить уточнити методи прогнозування гідравлічних втрат при промиванні глибоких свердловин.

З точки зору класичної фізики, більшість бурових розчинів є неньютонівськими рідинами. На відміну від води чи олії, їхня в'язкість не є сталою. В'язкість бурового розчину змінюється залежно від сили, прикладеної до системи, загалом та від швидкості руху цієї рідини у трубному та в затрубному просторі. У стані спокою розчин має гелеподібну структуру та проявляє властивості твердого тіла; під впливом зсувних напружень у нагнітальній системі структура руйнується, і система поводить як в'язка рідина.

Розуміння цієї фізичної трансформації - від в'язкості до тиксотропії - дозволяє відповідному персоналу керувати стабільністю свердловини та уникати аварій на глибинах у кілька кілометрів. Процес спорудження глибоких свердловин на нафту і газ супроводжується складними гідродинамічними процесами, ефективність яких безпосередньо залежить від реологічних параметрів бурових промивальних рідин. Сучасні бурові розчини є складними багатокомпонентними дисперсними системами, фізико-хімічна поведінка яких суттєво відхиляється від законів класичної гідродинаміки Ньютона. Таким чином, ефективність будівництва нафтових і газових свердловин безпосередньо корелює з якістю очищення вибою. Проблема полягає у необхідності одночасного забезпечення низької в'язкості в часі буріння та високої утримуючої здатності у стані спокою, про що зазначається у багатьох наукових працях як минулого так і теперішнього часу [7, 8].

Традиційно для опису течії бурових систем застосовують реологічні моделі Бінгама-Шведова та Оствальда-де-Ваале, однак вони не завжди повною мірою враховують часову динаміку структурних перетворень. Особливої уваги потребує дослідження переходу від в'язкопластичного

стану до тиксотропного відновлення структури, що є критично важливим для забезпечення стійкості стінок свердловини та ефективного винесення шлам.

Метою даної роботи є теоретичний аналіз фізичної природи неньютонівських властивостей бурових розчинів та дослідження механізмів тиксотропії як ключового фактора керування гідравлічними програмами буріння. Ефективність будівництва нафтових і газових свердловин безпосередньо залежить від якості очищення вибою від вибуреної породи та стабільності відкритого стовбура до його кріплення. За сучасних умов освоєння родовищ зі складними геолого-технічними характеристиками (значні глибини, похило-скеровані та горизонтальні профілі) роль промивальної рідини виходить за межі звичайного гідродинамічного середовища.

Проблема полягає у тому, що буровий розчин повинен одночасно задовольняти взаємовиключні фізичні вимоги, зокрема володіти низькою в'язкістю за високих швидкостей зсуву (у насадках долота), щоб мінімізувати енерговитрати на прокачування та максимізувати швидкість проходки на долото; виявляти високу утримуючу здатність у кільцевому просторі за низьких швидкостей, щоб запобігти осіданню важкого шлам; миттєво переходити у желеподібний стан під час зупинки циркуляції, що забезпечується властивістю тиксотропії.

Основним науковим завданням публікації є оптимізація реологічних параметрів, що потребує точного фізичного моделювання поведінки складних систем. Недосконалість існуючих методів розрахунку динамічного напруження зсуву призводить до помилок у визначенні гідродинамічних опорів, що може стати причиною поглинання розчину в пласт або, навпаки, газонафтоводопроїв (ГНВП).

Практичне значення з вирішення цих завдань дозволяє забезпечити цілісність стінок свердловини, зменшити зношувальність бурового обладнання та скоротити терміни будівництва свердловин, що є стратегічно важливим для енергетичного сектору економіки України.

Виклад основного матеріалу дослідження. Фундаментальні засади реології закладені у працях П. Ребіндера, В. Білецького[7] та Я. Коцкулича[8]. Питання моделювання течії розвинуто у роботах Р. Coussot [1] та J. Mewis [2]. Проте кінетика відновлення структури у динамічних умовах залишається дискусійною. В основі реологічної поведінки бурових систем лежить здатність частинок твердої фази до утворення просторових структур за рахунок сил Ван-дер-Ваальса та електростатичної взаємодії. З точки зору фізики, процес течії такого розчину можна розглядати як динамічну рівновагу між двома протилежними процесами: механічним руйнуванням структурних вузлів під дією напруження зсуву та їх спонтанним відновленням унаслідок броунівського руху. Саме ця рівновага зумовлює фізичну природу поведінки неньютонівської рідини.

Ефективна в'язкість описується модифікованим рівнянням Гершеля-Балклі з урахуванням потенціалу електростатичної взаємодії частинок [3, 10]. Тиксотропію ідентифіковано як релаксаційний процес, у межах якого параметр структурованості змінюється з часом [4, 11].

Особливий інтерес викликає використання графену та інших нано-модифікаторів для стабілізації тиксотропних властивостей, що детально описано у працях С. Gao [11]. Це дає змогу досягти ефекту «миттєвого гелю», фізична модель якого виходить за межі традиційних описів, запропонованих E. V. Oort [4].

Математично цей перехід найкраще описується через зміну ефективної в'язкості (η_{eff}), яка для більшості промивальних рідин є функцією не лише градієнта швидкості (dv/dx), але й часу дії навантаження.

Особливістю бурових систем як колоїдних суспензій є їхня здатність до оборотного ізотермічного переходу «золь – гель», що у нафтовій інженерії ідентифікується як тиксотропія. З позиції статистичної фізики, цей процес можна інтерпретувати як еволюцію енергетичного ландшафту системи, тобто, припинення зсувного навантаження призводить до мінімізації вільної енергії шляхом формування міжчастинкових контактів. У стані спокою частинки глинистої фази (бентоніту) або макромолекули полімерів орієнтуються таким чином, щоб створити неперервну просторову сітку. З точки зору фізики це проявляється у зростанні статичного напруження зсуву (СНЗ) з часом. Кінетика цього зростання не є лінійною і зазвичай описується експоненціальною залежністю[9], що вказує на наявність певного часу релаксації структури τ .

Важливо підкреслити різницю між в'язкістю та тиксотропною міцністю. В'язкість визначає внутрішню тертя між шарами рідини, що рухаються, тоді як тиксотропія характеризує «пам'ять» системи про стан спокою. Саме ця властивість є критичною для утримання шлам у завислому стані під час технологічних зупинок буріння.

Математичне моделювання цього явища вимагає введення параметра структурного розпаду λ . За умови $\lambda = 1$ система перебуває у повністю структурованому стані, тоді як $\lambda = 0$ відповідає повному руйнуванню структури під дією високих швидкостей зсуву в насадках долота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальні засади реології дисперсних систем, до яких належать бурові розчини, закладені у класичних відомих працях Ребіндера, де було вперше сформульовано поняття структуроутворення в рідких середовищах. Питання моделювання неньютонівської течії в каналах свердловин отримали розвиток у дослідженнях вітчизняних та закордонних науковців-дослідників, зокрема, М. Г. Касьяна, О. О. Орлова, а також у роботах Р. Бінгама та В. Гершеля.

Сучасний стан розв'язання цієї проблеми характеризується впровадженням комплексних хімічних реагентів-модифікаторів (полімерних сполук, наноцелюлози, графену), що детально висвітлено в нещодавніх публікаціях дослідників Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу [7] та Полтавської політехніки [8]. В цих роботах акцент зроблено на емпіричному підборі рецептур для стабілізації в'язкості в умовах високих температур.

Проте, незважаючи на значний прогрес, більшість авторів спирається на статичні реологічні моделі, які розглядають систему в усталеному режимі течії, залишаючи поза увагою перехідні процеси [6,9].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значну кількість експериментальних даних щодо в'язкісних характеристик бурових розчинів, питання кінетичної відповідності між швидкістю руйнування структурних зв'язків і часом їх відновлення в умовах турбулізації потоку залишається недостатньо висвітленим.

Невирішеними складовими проблемами залишаються: відсутність єдиного фізичного критерію, який пов'язував би енергію активації течії з параметрами тиксотропного структурування на молекулярному рівні; невизначеність механізму впливу надвисоких тисків на релаксаційні властивості структурованих систем, що призводить до похибок у розрахунках еквівалентної циркуляційної густини; а також недосконалість аналітичного опису поведінки розчинів у зоні переходу від ламінарного до турбулентного режиму течії з урахуванням «пам'яті» рідини (реологічної передісторії).

Саме акцентуванню уваги на цих аспектах, зокрема встановленню фізичних закономірностей еволюції реологічних параметрів у динамічних умовах, присвячено цю статтю.

Метою науковців-буровиків у подальшому мусить бути встановлення фізичних закономірностей динамічної трансформації структури неньютонівських бурових систем у процесі їх переходу від в'язкопластичного стану до тиксотропного відновлення. Для досягнення такої мети необхідно вирішити наступні завдання: проаналізувати енергетичну природу міжмолекулярних взаємодій у дисперсних системах бурових розчинів, що зумовлюють виникнення межі зсуву; дослідити кінетику зміни ефективної в'язкості під дією змінних швидкостей деформації з позиції механіки суцільних середовищ; обґрунтувати роль тиксотропних властивостей як фізичного регулятора гідравлічної стабільності стовбура свердловини, на завершення запропонувати уточнену модель інтерпретації реологічних кривих, що враховує релаксаційні ефекти структурованої рідини.

Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих результатів.

Фізична природа неньютонівської поведінки сучасних бурових систем обумовлена наявністю складної будови міжчастинкових зв'язків. Згідно з дослідженнями останніх років, опублікованими групою вчених під керівництвом Meeten G. H [3]. та P. Coussot [1], течію структурованих суспензій слід розглядати через призму енергії активації руйнування флокул. Сьогодні світова еліта реології (наприклад, праці у *Journal of Rheology* або *Rheologica Acta*) відходить від простого вимірювання в'язкості до аналізу LAOS (Large Amplitude Oscillatory Shear) - коливань великої амплітуди. Нами на основі теоретичних досліджень літературного пошуку встановлено, що при збільшенні градієнта швидкості зсуву (dy/dt) відбувається не просто механічне розсування шарів, а переорієнтація анізотропних частинок дисперсної фази вздовж ліній течії. Закордонні фахівці (зокрема у розробках *Schlumberger*) доводять, що цей процес супроводжується зменшенням локальної ентропії системи. З фізичної точки зору, ефективна в'язкість (η_{eff}) може бути описана модифікованим рівнянням, де враховується потенціал Юкави для електростатичної взаємодії частинок бентоніту:

$$\eta_{eff} = \eta_{\infty} + \frac{\tau_0 + k\dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}}$$

тут τ_0 - динамічне напруження зсуву, що корелює з енергією зв'язку у вузлах структурної сітки; η_{eff} - ефективна в'язкість (apparent viscosity); характеристика опору рідини течії при конкретній швидкості зсуву; η_∞ - гранична в'язкість за умови нескінченно великої швидкості зсуву (viscosity at infinite shear rate); мінімальна в'язкість, якої прагне рідина при дуже інтенсивній течії; τ_0 - межа текучості (yield stress); мінімальне механічне напруження, яке потрібно прикласти до рідини, щоб вона почала текти, до досягнення цього значення матеріал поводить себе як тверде тіло; $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву (shear rate); градієнт швидкості течії між шарами рідини; n - показник течії (flow behavior index); визначає тип нелінійності: якщо $n < 1$, рідина є псевдопластичною (розріджується при течії, наприклад, фарба або кетчуп); якщо $n > 1$, рідина є дилатантною (загущується під час течії).

Сама структура формули відображає закон $\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$, поділений на швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ для отримання в'язкості $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ з додаванням базової в'язкості η_{eff} .

Аналізуючи теоретичні результати закордонних досліджень щодо кінетики відновлення гелю (моделі Papantasiou), автор приходять до висновку, що тиксотропія не є миттєвим актом. Це релаксаційний процес, де параметр структурованості (λ) змінюється за законом:

$$\frac{d\lambda}{dt} = k_{rec}(1 - \lambda) - k_{break}\lambda\dot{\gamma}$$

тут k_{rec} - константа відновлення (броунівська коагуляція); k_{break} - константа руйнування (гідродинамічне розмивання).

Застосовуючи графік, отриманий за рахунок використання наявного програмного забезпечення, відновлення гелю (Gel Strength Recovery), що демонструє, як швидко та наскільки міцно «застигає» розчин після зупинки циркуляції, буде очевидним, що бентоніт: має поступове, майже лінійне зростання міцності структури. Це «повільна» тиксотропія. Він формує міцний гель через довгий час (наприклад, 10-хвилинна статична напруга зсуву значно вища за 10-секундну), на противагу - ксантанова камедь демонструє миттєве відновлення («fragile gel»), структура відновлюється майже на 90% у перші секунди, але її подальше зростання стає незначним. Звідси є важливий, однак відомий висновок про те, що на відміну від бентонітових систем, що потребують тривалого часу для формування коагуляційних контактів, ксантанова камедь формує стабільну структуру майже миттєво, що критично важливо для утримання шламу при короткочасних зупинках насосів. Площа петлі, отримана у результаті досліджень, засвідчує, що чим більша площа між висхідною та низхідною кривими, тим вища тиксотропія розчину, а порівняння тих кривих, доводить, що бентонітові суспензії зазвичай мають ширшу петлю гістерезису, оскільки їхня структура руйнується і відновлюється повільніше. Суміші з ксантаном мають вужчу петлю, що свідчить про швидшу реакцію на зміну гідродинамічних умов.

До прикладу можна використати такі дані для побудови діаграми що наведено у таблиці 1, нижче.

Табл. 1

Таблиця для порівняння (дані для побудови діаграми)

Параметр	Бентонітовий розчин (5-6%)	Полімерний розчин (XG 0,5%)
СНЗ 10 сек (Па)	Низька (~2-4)	Висока (~6-8)
СНЗ 10 хв (Па)	Висока (~12-20)	Стабільна (~8-10)
Тип гелю	Прогресуючий (Hard)	Крихкий (Fragile)
Вплив солей	Чутливий (флокуляція)	Стійкий

Бачення майбутніх результатів: На основі проведеного теоретичного аналізу прогнозується, що майбутні дослідження будуть зосереджені на створенні «розумних» розчинів із керованою магнітною або електричною реологією (ER/MR fluids). Це дасть змогу оперативно змінювати міцність гелю шляхом подачі зовнішнього поля, що істотно зменшить ризик осідання шламу під час глибокого буріння. Автор вважає, що інтеграція наносилікатів дасть змогу отримати

розчини з практично нульовим часом релаксації, що є критично важливим для горизонтальних ділянок великої протяжності.

Висновки:

Проведене теоретичне дослідження фізичної природи неньютонівських бурових систем дозволяє зробити наступні ствердження:

1. Реологічна поведінка бурових розчинів є результатом динамічної конкуренції між термодинамічно зумовленим процесом структурування (тиксотропією) та гідродинамічним руйнуванням агрегатів. Оптимізація цього балансу є ключовою умовою керування гідродинамічними характеристиками свердловини.

2. Використання лише статичних моделей (наприклад, Бінгама-Шведова) без урахування часової релаксації структури призводить до суттєвих похибок (до ~ 20-30%) розрахунку часу пускових тисків після зупинки циркуляції.

3. Для глибокого буріння перспективним є перехід до розчинів із нелінійним профілем відновлення структури, що дає змогу поєднати високу рухливість у турбулентному режимі з миттєвим гелеутворенням у стані спокою.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні цифрових двійників («digital twins») промивальних рідин на основі нейронних мереж, які здатні в режимі реального часу прогнозувати зміну реологічного спектру під впливом деградації полімерів та температур у вибої. Особливу увагу слід приділити дослідженню мікрореології за допомогою лазерної інтерферометрії, що дозволить візуалізувати процеси руйнування «структурних містків» на нанорівні.

За результатами проведеного теоретичного фізико-технічного аналізу реологічної поведінки бурових промивальних систем як складних неньютонівських середовищ сформульовано такі важливі висновки:

1. Фізична природа неньютонівських властивостей бурових розчинів зумовлена динамічною рівновагою між ентропійним чинником орієнтації макромолекул та енергетичним бар'єром руйнування міжчастинкових контактів.

2. Перехід від в'язкопластичного стану до течії є фазовим переходом «структура–хаос», що вимагає застосування нелінійних моделей (зокрема Гершеля-Балклі) для адекватного інженерного розрахунку.

3. Феномен тиксотропії ідентифіковано як релаксаційний процес із певним спектром часу відновлення. Очевидно, що задля запобігання седиментації шламу в глибоких свердловинах критичним є не стільки абсолютне значення статичного напруження зсуву, скільки швидкість його наростання у перші 10 секунд після зупинки циркуляції.

4. Порівняльний аналіз результатів закордонних досліджень [4, 6] засвідчує, що майбутнє реологічного контролю пов'язане з упровадженням інтелектуальних систем із наномодифікаторами, які забезпечують термостабільність в'язкості в умовах НРНТ (high pressure, high temperature).

Перспективи подальших досліджень полягають у створенні аналітичних моделей, що інтегрують реологічні рівняння стану з алгоритмами машинного навчання для адаптивного керування процесом промивання в режимі реального часу («Smart Drilling Fluids»).

Список використаних джерел.

1. Coussot P. Yield stress fluids: a review. *Rheologica Acta*. 2014. Vol. 53, No. 1. P. 1–36 <https://api.philippecoussot.com/assets/publication/135-yield-stress-fluid-flows-a-review-of-experimental-data.pdf>

2. Mewis J., Wagner N. J. Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009. Vol. 147. P. 214–227. <https://doi.org/10.1016/J.CIS.2008.09.005>

3. Meeten G. H. Effects of flow history on the structure and rheology of drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2005. Vol. 46, No. 3. P. 171–185. DOI: doi.org

4. Oort E. V. On the Mechanics and Chemistry of Drilling Fluids. *Oil & Gas Science and Technology*. 2003. Vol. 58, No. 2. P. 213–241. <https://actascientific.com/ASMI/pdf/ASMI-02-0355.pdf>

5. Gao J. P., Sun J. S. Advanced nanotechnology for drilling fluids: A review. *Petroleum Science*. 2023. Vol. 20, No. 2. https://www.sciopen.com/local/article_pdf/10.1016/j.petsci.2023.08.015.pdf

6. API RP 13B-1. Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids. 5th ed. Washington, D.C. : API, 2014. 230 p. https://www.drillingmanual.com/api-rp-13b-1-download-pdf-best-practice-for-field-testing-wbm/#google_vignette
7. Білецький В. С., Орловський В. М., Вітрик В. Г. Основи буріння свердловин. Львів : Новий Світ-2000, 2022. 352 с. https://www.researchgate.net/profile/Volodymyr-Biletskyi/publication/367309650_Orlovskij_V_M_Bileckij_V_S_Sirenko_V_I_Naftogazovilucenna_z_v_azkodostupnih_i_visnazenih
8. Коцкулич Ю. С., Кочкодан Я. М. Буріння нафтових і газових свердловин. Коломия : Вік, 1999. 504 с. <https://nung.edu.ua/sites/default/files/2023-02/ongs.pdf>
9. Nelson E. B., Guillot D. Well Cementing. 2nd ed. Houston : Schlumberger, 2006. 773 p. <https://www.scribd.com/document/436339399/Well-Cement-Integrity-and-Cementing-Practices>
10. Zhong H., Qiu Z., Huang W. Rheological models of drilling fluids: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 196. 107804. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107804
11. Gao C., et al. Effect of graphene oxide on the rheological properties of water-based drilling fluids. *Petroleum Science*. 2022. Vol. 19, No. 3. P. 1120–1132. DOI: [10.1021/acsomega.1c04398](https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04398)

Рецензент: Олег МАРЦИНКІВ, завідувач кафедри «Буріння свердловин» ІФНТУНГ, к.т.н., доцент.

Дата надходження статті до видання: 12.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

Н.М. Гулієва^[0000-0001-9282-4880], Л.М. Самчук^[0000-0003-2516-045X], Т.Є. Божко^[0000-0003-2956-2384]

Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ САПОНІТ – ТИТАНОВИХ ФІЛЬТРІВ

У статті представлено результати експериментальних досліджень гідравлічної проникності сапоніт – титанових фільтрів. Фільтрувальний матеріал отримано методом гідравлічного сухого пресування із наступним спіканням на основі сапоніту як природного алюмосилікатного адсорбенту та титану як структуроутворюючого компонента.

Проведено аналіз пористості матеріалу та встановлено залежність коефіцієнта проникності від гранулометричного складу. Виявлено оптимальні параметри мікроструктури, що забезпечують ефективне поєднання механічної міцності та високої фільтраційної здатності. Отримані результати можуть бути використані при створенні нових типів керамічних фільтрів для очищення рідин і газів у хімічній, екологічній та енергетичній галузях.

Ключові слова: сапоніт–титанові композиційні фільтри, гідравлічна проникність, порова структура, пористість, гранулометричний склад, мікроструктурні характеристики.

Н.М. Hulieva, L.M. Samchuk, T.Ye. Bozhko

STUDY OF HYDRAULIC PERMEABILITY OF SAPONITE – TITANIUM FILTERS

The paper presents the results of experimental studies of the hydraulic permeability of saponite – titanium filters. The filtering material was obtained by the method of hydraulic dry pressing with subsequent sintering based on saponite as a natural aluminosilicate adsorbent and titanium as a structure-forming component.

The porosity of the material was analyzed and the dependence of the permeability coefficient on the particle size distribution was established. The optimal microstructure parameters were identified, which provide an effective combination of mechanical strength and high filtration capacity. The results obtained can be used in the creation of new types of ceramic filters for the purification of liquids and gases in the chemical, environmental and energy industries.

Keywords: saponite–titanium composite filters, hydraulic permeability, pore structure, porosity, particle size distribution, microstructural characteristics.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток промисловості, сільського господарства та комунального господарства супроводжується зростанням потреби в ефективних системах очищення рідин, зокрема води. Однією з головних вимог до таких систем є поєднання високої фільтрувальної здатності, хімічної та механічної стійкості, а також довговічності фільтрувальних матеріалів. У цій проблематиці особливу увагу привертають композиційні фільтрувальні матеріали на основі природних мінералів та металів.

Сапоніт, як представник шаруватих силікатів, характеризується високою сорбційною здатністю, розвиненою питомою поверхнею та екологічною безпечністю [1]. Титан і титанові сполуки, у свою чергу, відзначаються високою корозійною стійкістю, механічною міцністю та стабільністю в агресивних середовищах [2]. Поєднання сапоніту з титановою матрицею дає змогу створювати перспективні фільтрувальні матеріали з покращеними експлуатаційними характеристиками [3].

Однією з найважливіших характеристик фільтрів є їх гідравлічна проникність, яка визначає здатність матеріалу пропускати рідину під дією перепаду тиску. Саме цей параметр суттєво впливає на продуктивність фільтра, енерговитрати процесу фільтрації та ефективність очищення. Тому дослідження гідравлічної проникності сапоніт–титанових фільтрів є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останнє десятиліття інтерес до композитів на основі глин (бентоніту, сапоніту) і титанових добавок (TiO_2 або металевий титан) зріс через поєднання адсорбційних, каталізаційних властивостей таких матеріалів. Дослідження охоплюють як експериментальні роботи з отримання і випробування фільтрів, так і моделювання гідродинаміки в реалістичній мікроструктурі пористих матеріалів [4].

Наведені експериментальні дані щодо проникності та порової структури сапоніту як мінерального наповнювача, що забезпечує високу питому поверхню, розвинену мікропористість і значну водовбирну здатність та впливає на формування фільтраційного шару, що змінює ефективну гідравлічну проникність [5].

Досліджена інтеграція титану або TiO_2 у матрицю, яка може мати подвійний ефект: з однієї сторони – покращує міцність, гідрофільність і антифуалінгові (фотокаталітичні) властивості,

з іншої – при певних умовах зменшує середній розмір пор i , як наслідок, знижує прохідність. Кількісні ефекти залежать від форми (наночастинки, плівка, нитки), локалізації в структурі та концентрації добавки [6–8].

Сучасні роботи застосовують поєднання мікроструктурної цифрової обробки (мікро-СТ, SEM) з чисельними рішеннями (Нав'є Стока) для обчислення ефективної гідравлічної провідності матеріалів з необхідною пористістю. Такі підходи вже були успішно застосовані для подібних глиняних композитів [9].

Результати показують, що сапоніт–титанові композити перспективні для фільтрації питної та стічної води (комбінація адсорбції домішок та фотокаталітичного знезараження TiO_2), а також для створення керамічних або мембранних матеріалів з підвищеною стійкістю до забруднення. Проте межа між проникністю (продуктивністю) і ступенем очищення/адсорбцією залишається головним при проектуванні [10].

Актуальність дослідження полягає в перспективності сапоніт – титанових композитів як фільтруючих матеріалів із корисними адсорбційно-каталітичними властивостями, проте кількісні дослідження саме гідравлічної проникності таких систем поки що фрагментарні. Щоб перейти від лабораторних демонстрацій до інженерного застосування, необхідно провести стандартизовані експерименти із серією зразків із мікроструктурним моделюванням та дослідженням експлуатаційної властивостей фільтрів.

Метою даного дослідження є визначення закономірностей формування порової структури та кількісна оцінка гідравлічної проникності сапоніт–титанових фільтрів залежно від складу, умов виготовлення та структурних характеристик.

Викладення основного матеріалу. Для науково-експериментального дослідження використовували сапоніт-титанові фільтри [11] з різною поровою прохідністю фільтрувального матеріалу (табл. 1). Товщина фільтрувального шару становила $L=50$ мм із в'язкістю води $\mu=1,0 \times 10^{-3}$ Па/с та щільністю $\rho=1000$ кг/м³.

Табл. 1

Порова прохідність фільтрувального матеріалу

Велика, (режим А)	Середня, (режим Б)	Тонка, (режим В)
к, м ²		
$1,0 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-11}$	$1,0 \times 10^{-12}$

Для оцінки напору використовували закон Дарсі для фільтрації:

$$\Delta P = \mu \frac{V}{k} L \quad (1)$$

де V – швидкість потоку, м/с.

Обчислення в метрах водяного стовпчика:

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (2)$$

При режимі А, великій прохідності пористого фільтрувального матеріалу та середньому розмірі пор ≈ 50 – 100 μm спостерігається висока пропускна здатність, переважно поверхневе очищення. Де швидкість фільтрування V становить $0,0013888889$ м/с.

За формулою (1) визначаємо напір для режиму Б:

$$\Delta P = 1,0 \times 10^{-3} \times \frac{0,0013888889}{1,0 \times 10^{-10}} \times 0,05 = 694,444 \text{ Па.}$$

За формулою (2) проводиться обчислення для режиму Б в метрах водяного стовпчика:

$$h = \frac{694,444}{1000 \times 9,81} \approx 0,071 \text{ м.в.ст.}$$

Сапоніт – титановий фільтр великої прохідності має такі технічні характеристики:

- велику пропускну здатність, малу ймовірність забруднення дрібними колоїдами;
- видалення частинок розміром $> \sim 50$ μm ;
- високу ефективність (> 95 %);
- не дуже ефективний для дрібних колоїдів (розчинених домішок) – може знадобитися коагуляція (адсорбція).
- рідке промивання;
- перепад тиску на допустимому рівні ($\sim < 0,2$ – $0,5$ м) довший час.

При режимі *B*, середній прохідності пористого фільтрувального матеріалу для середнього розміру пор $\approx 5\text{--}20\ \mu\text{m}$ спостерігається менша пропускна здатність, переважно поверхнєве очищення. Де швидкість фільтрування V становить $0,00027777778\ \text{м/с}$.

За формулою (1) визначаємо напір для режиму *B*:

$$\Delta P = 1,0 \times 10^{-3} \times \frac{0,00027777778}{1,0 \times 10^{-11}} \times 0,05 = 1388,8889\ \text{Па}.$$

За формулою (2) проводиться обчислення для режиму *B* в метрах водяного стовпчика:

$$h = \frac{1388,8889}{1000 \times 9,81} \approx 0,142\ \text{м.в.ст.}$$

Сапоніт – титановий фільт середньої прохідності має такі властивості:

- видалення частинок середнього розміру ($\geq 5\ \mu\text{m}$);
- дуже добре очищення (80–98 % залежно від розподілу частинок).
- частинки $< 1\text{--}2\ \mu\text{m}$ частково захоплюються в глибині, але ефективність нижча;
- для поліпшення необхідно застосовувати коагулянти або тонкопористий верхній шар.
- частіше обслуговування, ніж у великопористому режимі;
- важливий контроль ΔP ,
- необхідно планувати коагуляцію при досягненні порогу (наприклад, $+0,2\text{--}0,3\ \text{м}$).

При режимі *B*, тонкопористій прохідності пористого фільтрувального матеріалу при середньому розмірі пор $\approx 0,5\text{--}2\ \mu\text{m}$ спостерігається низька пропускна здатність та високоефективне фільтрування. Де поверхнєва швидкість фільтрування V становить $5,5555556 \times 10^{-5}\ \text{м/с}$.

За формулою (1) визначаємо напір для режиму *B*:

$$\Delta P = 1,0 \times 10^{-3} \times \frac{5,5555556 \times 10^{-5}}{1,0 \times 10^{-12}} \times 0,05 = 2777,7778\ \text{Па};$$

За формулою (2) проводиться обчислення для режиму *B* в метрах водяного стовпчика:

$$h = \frac{2777,7778}{1000 \times 9,81} \approx 0,283\ \text{м.в.ст.}$$

Сапоніт – титановий фільт тонкої прохідності має такі технічні властивості:

- високу ефективність видалення дрібних частинок та значне зменшення мутності;
- може затримувати частинки розміром $\sim 1\ \mu\text{m}$ і більші;
- значно більший перепад тиску при тій же товщині шару;
- потребує нижчих швидкостей, частішого промивання або більшої насосної потужності.
- краща адсорбційність сапоніту;
- видалення важких іонів та органічних речовин.

Для збереження пропускної здатності зазвичай виготовляють градієнтні фільтри [12] з декількох шарів: верхній тонкопористий шар для тонкого освітлення та внутрішній шар для механічної очистки.

За результатами науково-експериментальних встановлено, що гідравлічна проникність сапоніт – титанових фільтрів суттєво залежить від гранулометричного складу та співвідношення композиту, що визначають формування мікроструктури матеріалу. Для трьох експериментальних режимів виготовлення фільтрів (табл. 1) коефіцієнт проникності k змінювався в межах від $1,0 \times 10^{-10}\ \text{м}^2$ до $1,0 \times 10^{-12}\ \text{м}^2$, що відповідає переходу від крупнопористої до тонкопористої структури.

У зразках режиму *A*, де переважають макропори розміром $50\text{--}100\ \mu\text{m}$, спостерігалася висока пропускна здатність при швидкості фільтрування близько $5\ \text{м/год}$. Такі фільтри характеризуються мінімальним гідравлічним опором і забезпечують ефективне видалення механічних домішок розміром понад $50\ \mu\text{m}$. Проте через переважно поверхнєве затримання домішок їх ефективність щодо дрібнодисперсних частинок є обмеженою. Це свідчить про те, що в макропористих структурах основним механізмом є грубе фільтрування, тоді як адсорбційна складова сапоніту практично не реалізується.

Для середньопористих зразків (режим *B*) зі середнім розміром пор $5\text{--}20\ \mu\text{m}$ коефіцієнт проникності $k=1,0 \times 10^{-11}\ \text{м}^2$. Швидкість фільтрування становить близько $1\ \text{м/год}$, що забезпечує видалення частинок середнього розміру ($\geq 5\ \mu\text{m}$) із загальною ефективністю очищення 80–98 %. У таких композитах відбувається комбінований механізм фільтрації – поверхнєве осідання частинок поєднується з їх частковим захопленням у глибині пор. Це забезпечує стабільну роботу фільтра при

помірних витратах енергії, проте вимагає періодичного промивання для запобігання росту гідравлічного опору.

Найменший коефіцієнт проникності ($1,0 \times 10^{-12} \text{ м}^2$) спостерігався у зразках режиму *B*, де середній розмір пор становить $0,5\text{--}2 \text{ мкм}$. Відповідно, швидкість фільтрування знижується до $0,2 \text{ м/год}$, але ефективність видалення частинок підвищується до майже 100% . Підвищений перепад тиску на фільтрі свідчить про необхідність роботи при менших швидкостях або застосування градієнтної системи фільтрації (рис. 1). В даних зразках чітко проявляється адсорбційна здатність сапоніту – завдяки кращій пористості спостерігалось помітне зниження кольоровості та мутності води, що вказує на додаткове видалення розчинених органічних речовин та іонів важких металів.

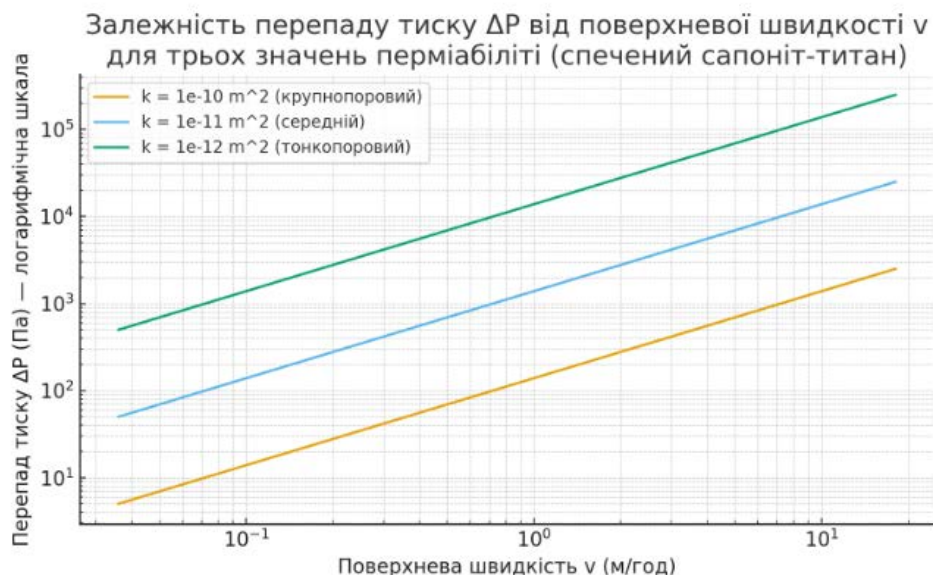


Рис.1. Градієнтна система фільтрації

Порівняння результатів експерименту з літературними даними [2–6] показало узгодженість отриманих значень коефіцієнтів проникності з відомими моделями пористих алюмосилікатних композитів. Спостерігається типовий степеневий зв'язок між коефіцієнтом проникності k та середнім діаметром пор d виду $k \sim d^{2,5-3,0}$, що підтверджує переваги ламінарного режиму течії (закон Дарсі). Додатково встановлено, що збільшення частки титану у композиції (більше 30%) спричиняє часткове ущільнення структури та зменшення ефективної пористості на $10\text{--}15 \%$, що знижує проникність, але підвищує механічну міцність фільтра.

Мікроструктурний аналіз показав, що наявність титанових включень сприяє формуванню стійкої зв'язаної сітки пор, яка забезпечує рівномірний розподіл потоків і зменшує ризик локального засмічення. Це особливо важливо для довготривалого використання фільтрів у динамічних умовах. Визначені оптимальні співвідношення параметрів пористості ($30\text{--}35 \%$) і проникності (10^{-11} м^2), що забезпечують баланс між продуктивністю та якістю очищення.

Отже, результати експерименту свідчать, що сапоніт–титанові фільтри можуть бути ефективно використані для попереднього й тонкого очищення води, а також як базові елементи в багатошарових мембранних системах. Наступні дослідження доцільно спрямувати на вивчення впливу тривалого циклічного навантаження на стабільність гідравлічної проникності та кореляцію між мікроструктурою та адсорбційною активністю матеріалу.

Висновки.

1. Проведені експериментальні дослідження показали, що гідравлічна проникність сапоніт – титанових фільтрів суттєво залежить від гранулометричного складу та співвідношення компонентів композиту. Зменшення середнього розміру пор із $50\text{--}100 \text{ мкм}$ до $0,5\text{--}2 \text{ мкм}$ супроводжується зниженням коефіцієнта проникності з $1,0 \times 10^{-10}$ до $1,0 \times 10^{-12} \text{ м}^2$ та підвищенням ефективності фільтрації від 90 до $99\text{--}100 \%$.

2. Оптимальні фільтраційні властивості досягаються при середньопористій структурі (режим *B*) із коефіцієнтом проникності $k \approx 1,0 \times 10^{-11} \text{ м}^2$, де забезпечується баланс між пропускною здатністю, якістю очищення та енергетичними витратами.

3. Встановлено, що титанові включення виконують функцію структуроутворюючого компонента, який підвищує механічну міцність і стабільність мікропористої структури. При вмісті

титану понад 30 % спостерігається ущільнення матриці, зменшення ефективної пористості на 10–15 % та відповідне зниження проникності.

4. У зразках із дрібнопористою структурою (режим В) чітко проявляється адсорбційна активність сапоніту, що забезпечує додаткове видалення розчинених органічних речовин і важких іонів. Це вказує на можливість поєднання механічної та сорбційної фільтрації в одному матеріалі.

5. Порівняння експериментальних результатів із відомими літературними даними підтвердило відповідність отриманих коефіцієнтів проникності класичним закономірностям Дарсі та степеневій залежності $k \sim d^{2,5-3,0}$, характерній для пористих алюмосилікатних композитів.

6. Отримані результати свідчать про перспективність використання сапоніт – титанових композитів для створення ефективних фільтраційних елементів у системах очищення рідин і газів. Наступні дослідження доцільно спрямувати на аналіз довготривалої стабільності проникності, впливу температурних режимів і циклічних навантажень на експлуатаційні характеристики фільтрів.

Список використаних джерел

1. Huliieva N.M., Somov D.O., Pasternak V.V., Samchuk L.M., Chetverzhuk T.I. The selection of boron nitride circles for grinding saponite – titanium composites using non-parametric method. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2020. Vol. 57(6). P. 36-47. DOI: 10.2478/lpts-2020-0033
2. Bouchelaghem F., Pusch R. Fluid flow and effective conductivity calculations on numerical images of bentonite microstructure. *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 144. P. 9-18. DOI: 10.1016/j.clay.2017.04.023
3. Brochard L. Swelling of montmorillonite from molecular simulations: hydration diagram and confined water properties. *Phys. Chem*. 2021. Vol. 125 P. 15527-15543. Режим доступу – <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.1c02659>
4. Kageshima Yo., Yagawa K., Teshima K., Nishikiori H. Photoinduced cooling effect of water-retentive composite of TiO₂ and saponite. *Applied Clay Science*. 2025, Vol. 267. P. 107712. DOI: 10.1016/j.clay.2025.107712
5. Sokol H., Sprynskyy M., Ganzyuk A., Raks V. Buszewski B. Structural, Mineral and Elemental Composition Features of Iron-Rich Saponite Clay from Tashkiv Deposit (Ukraine). *Colloids and Interfaces*. 2019. Vol. 3(1). P. 10. DOI: 10.3390/colloids3010010
6. Birsan Iu.-G., Pintilie S.C., Pintilie L.G., Lazar A.L., CIRCUMARU A., Balt S. New Understanding of the Difference in Filtration Performance between Anatase and Rutile TiO₂ Nanoparticles through Blending into Ultrafiltration PSF Membranes. *Membranes*, 2021. Vol. 11 P. 841. Режим доступу – <https://www.mdpi.com/2077-0375/11/11/841>
7. Pasternak, V., Samchuk, L., Huliieva, N., Andrushchak, I., Ruban, A. Investigation of the Properties of Powder Materials Using Computer Modeling. *Materials Science: Forum* is disabled. 2021, 1038 MSF, P. 33–39. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.33
8. Viccione G., Evangelista S., De Marinis G. Experimental Analysis of the Hydraulic Performance of Filtering Cartridges in Drinking Water Networks. *Water*. 2018. Vol. 10(5). P. 629. DOI: 10.3390/w10050629
9. Coelho Jo.S.T., P´erez-Sanchez M., Coronado-Hernandez O.E., Besharat M., Feng R.-L., Tasca E., Zhou L., Ramos H.M. Hydropneumatic storage methodology towards a new era of hybrid energy system's efficiency and flexibility. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 24. P. 103117. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103117
10. Matei S., Stoicanescu M., Bela V., Tiron E., Crisan A. Bentonite-based composites with ceramic and metallic powders additions for use as filters. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 13(4). P. 15. DOI: 10.1177/16878140211011888
11. Huliieva N.M., Pasternak V.V. Isothermal mechanical Cycling of Saponite–Titanium Composites in Conditions of Complex Stressed State. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2022. Vol. 59(6). P. 12–21. DOI: 10.2478/lpts-2022-0043.
12. Zabolotnyi O., Sychuk V.A., Povstyanoi O. Yu., Somov D. Slabkyi A. Obtaining of Highly Efficient Powdered Filtering Materials for Cleaning Liquids and Gases. *Management of Manufacturing Systems: 3rd EAI International Conference. MMS 2018, November 06-08, Dubrovnik, Croatia*. P. 1-10. DOI: 10.4108/eai.6-11-2018.2279607

Дата надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

Кондусь В. Ю.¹[0000-0003-3116-7455], Куліков О. А.¹[0000-0001-7222-8766], Андрусак В. О.¹[0000-0003-2089-9423],
Муштай М. В.¹[0009-0006-3102-2351], Твердохлеб А. С.¹, Дідик А. М.²[0000-0002-0524-0017]

Сумський державний університет¹, Вінницький національний аграрний університет²

ТРАНСФОРМАЦІЯ СТРУКТУРИ ПОТОКУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІЛЬНОВИХРОВОГО НАСОСА В РЕЖИМАХ ЧАСТКОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ($Q = 0,05-0,6 Q_{ном}$)

У роботі наведено результати чисельного дослідження робочих характеристик вільновихрового насоса СВН 80-32 у зоні знижених подач $Q = 0,05-0,6 Q_{ном}$. Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни напірних та енергетичних показників і визначення особливостей трансформації структури внутрішнього потоку при переході від помірного до глибокого недовантаження. Розрахунки виконано в програмному середовищі ANSYS CFX у стаціонарній постановці з використанням моделі турбулентності $k-\epsilon$. Проаналізовано два конструктивні виконання робочого колеса – одноярусне та двоярусне. Побудовано інтегральні характеристики $H(Q)$ та $\eta(Q)$, визначено зміни повного напору, споживаної потужності та коефіцієнта корисної дії в досліджуваному діапазоні подач. Встановлено, що в зоні недовантаження напір змінюється незначною мірою, тоді як ККД суттєво знижується через інтенсифікацію внутрішньої рециркуляції та зростання гідравлічних втрат у вільній вихровій камері. Показано, що при $Q = 0,05 Q_{ном}$ формується стійка циркуляційна структура, яка забезпечує підтримання напору за одночасної деградації енергетичних показників. Виявлено, що двоярусне робоче колесо забезпечує децю вищі значення ККД у верхній частині досліджуваного діапазону подач. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування меж раціональної експлуатації та вдосконалення конструкцій вільновихрових насосів.

Ключові слова: вільновихровий насос; вихровий насос; робота при частковому навантаженні; режим малих подач; гідравлічний ККД; CFD-моделювання; модель турбулентності $k-\epsilon$; структура внутрішнього потоку; рециркуляція; енергетичні показники.

V. Kondus, O. Kulikov, V. Ahdrusiak, M. Mushtai, A. Tverdokhle, A. Didyk

FLOW STRUCTURE TRANSFORMATION AND ENERGY PERFORMANCE OF A TORQUE-FLOW PUMP UNDER PARTIAL-LOAD CONDITIONS ($Q = 0.05-0.6 Q_{NOM}$)

The research presents the results of a numerical investigation of the operating characteristics of a torque-flow pump SVN 80-32 in the low-flow range $Q = 0.05-0.6 Q_{nom}$. The aim of the study is to determine the regularities of changes in head and energy performance indicators and to identify the transformation features of the internal flow structure under partial-load conditions. The simulations were performed in ANSYS CFX using a steady-state formulation and the $k-\epsilon$ turbulence model. Two impeller configurations, single-tier and double-tier, were analyzed. Integral characteristics $H(Q)$ and $\eta(Q)$ were obtained, and variations of total head, consumed power, and hydraulic efficiency within the investigated flow range were determined. The results show that in the partial-load zone the head remains relatively stable, while the efficiency significantly decreases due to intensified internal recirculation and increased hydraulic losses in the vortex chamber. At $Q = 0.05 Q_{nom}$ a stable circulatory flow structure is formed, maintaining head generation despite severe efficiency degradation. The double-tier impeller demonstrates slightly higher efficiency values in the upper part of the investigated flow range. The obtained results may be used to substantiate rational operating limits and to improve the design of torque-flow pumps operating under variable flow conditions.

Keywords: torque-flow pump; vortex pump; partial-load operation; low-flow regime; hydraulic efficiency; CFD modeling; $k-\epsilon$ turbulence model; internal flow structure; recirculation; energy performance.

1. Introduction

Torque-flow pumps (Fig. 1) are widely used for pumping liquids containing solid and fibrous inclusions due to the presence of a free vortex chamber and the reduced risk of clogging of the flow passage.

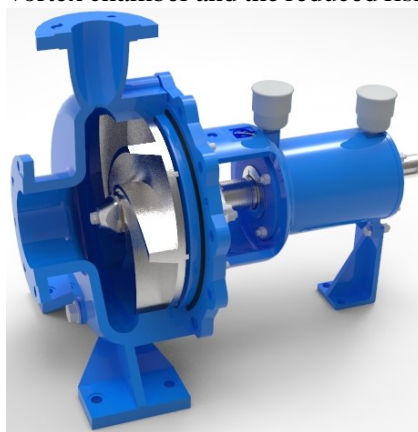


Fig. 1. Design features of torque-flow pumps of the SVN type

© Кондусь В. Ю., Куліков О. А., Андрусак В. О., Муштай М. В.,
Твердохлеб А. С., Дідик А. М.

Classical experimental and analytical studies have shown that the operating process in such pumps is characterized by a combination of blade and vortex mechanisms of energy transfer, while the head characteristic typically exhibits a relatively flat shape over a wide flow rate range [1, 2]. Further generalizations of experimental data confirm the significant influence of the geometric parameters of the impeller and the flow passage on head and energy performance, particularly on the magnitude of hydraulic losses in the vortex chamber [3, 4].

In recent years, considerable attention has been paid to CFD investigations and parametric optimization of pump tiers, which allow analysis of velocity and pressure fields as well as assessment of the influence of design factors on pump performance without conducting a large number of full-scale experiments [5, 6, 7]. For engineering analysis, steady-state formulations and RANS turbulence models are widely applied, providing an acceptable compromise between accuracy and computational cost [8]. Some studies also demonstrate that factors such as wall roughness may significantly affect CFD-based predictions of energy performance indicators [9].

At the same time, most available studies focus on operating conditions close to the nominal regime, whereas in real operating conditions pumping units often function in the partial-load zone due to throttling, variable network demand, or technological constraints. For torque-flow pumps, a reduction in flow rate is accompanied by intensified recirculation phenomena and increased flow non-uniformity, which may lead to a significant decrease in efficiency and alterations in the flow structure within the interblade channels and the vortex chamber [1, 2]. Unsteady effects and the growth of vortex structure intensity in vortex pumps operating far from nominal conditions are actively discussed in recent publications, highlighting the relevance of a detailed analysis of low-flow regimes [10, 11].

The issue of operational reliability under off-design conditions is also of practical importance. Variations in hydrodynamic loading and deterioration of energy performance may be accompanied by increased vibration manifestations and risks of damage to pump components, as confirmed by approaches to failure and reliability analysis of pumping equipment [12, 13]. In addition, for pumps operating over a wide range of regimes, cavitation resistance remains an important aspect, and modern experimental and numerical approaches propose criteria and indicators for assessing cavitation inception from the standpoint of energy efficiency and reliable operation [14, 15].

In this context, the investigation of operating characteristics and internal flow structure of a torque-flow pump in the low-flow range $Q = 0.05\text{--}0.6 Q_{\text{nom}}$ is of particular relevance, since a qualitative restructuring of the internal flow occurs and degradation of energy performance becomes apparent in this zone. In the present study, a numerical analysis of performance characteristics and flow fields of a torque-flow pump with two impeller configurations was performed in order to establish the regularities of head and efficiency variation and to compare the influence of impeller design on flow uniformity under partial-load conditions [3, 5, 6, 7].

2. Literature Review and Problem Statement

An analysis of recent studies shows that the majority of research in the field of torque-flow pump implementation is focused on geometric optimization of impellers and improvement of energy efficiency in the vicinity of the nominal flow rate. Parametric investigations of blade wrap angle, axial clearances, number of blades, and configuration of interblade channels demonstrate a significant influence of these factors on head and efficiency [5, 6, 7]. Numerical methods are actively applied for multi-objective optimization and performance prediction of pumps of various types [16, 17, 18].

A separate research direction concerns the improvement of impeller design, particularly through the application of multi-tier or combined blade systems. It has been shown that such configurations may provide a more uniform velocity distribution in the interblade channels and influence the shape of the head characteristic [3, 4]. Within the Ukrainian scientific school, it has also been established that the geometric parameters of curvilinear blades significantly determine the structure of the internal flow and the ratio between blade and vortex mechanisms of energy transfer [19, 20], while the combined operating process may alter the pump's energy performance depending on the operating regime [21, 22].

At the same time, the literature analysis reveals an imbalance in the investigation of different operating regimes. While nominal and overload conditions have been thoroughly examined from the standpoint of CFD analysis and experimental validation, the low-flow region has been studied only fragmentarily. Existing publications are generally limited to a qualitative statement of increased losses and reduced efficiency at decreased flow rates, without a systematic analysis of the evolution of velocity fields in the interblade channels and the free vortex chamber.

Recent studies devoted to the analysis of unsteady processes in torque-flow pumps indicate that deviations from nominal operation are accompanied by increased intensity of vortex structures and hydrodynamic oscillations [10, 11]. However, even in these investigations, the main emphasis is placed on dynamic characteristics, whereas a systematic analysis of energy performance degradation in the deep partial-load range remains limited.

An additional factor complicating the assessment of low-flow regimes is the possible increase in local hydraulic losses and enhanced sensitivity to cavitation phenomena, as confirmed by modern experimental and numerical studies of various pump types [14, 15]. From a practical standpoint, prolonged operation outside the recommended flow range is associated with increased vibration loading and a higher risk of equipment reliability reduction [12, 13], which further emphasizes the necessity of clearly defining rational operating limits.

Thus, despite the availability of numerous studies devoted to geometric optimization and CFD modeling of torque-flow pumps, the issue of regularities in head and energy performance variation in the range $Q = 0.05 - 0.6 Q_{nom}$, as well as the transformation of the flow structure in this region, remains insufficiently investigated. This is particularly relevant for comparing different impeller configurations in terms of velocity distribution uniformity and the intensity of recirculation zones under deep partial-load conditions.

Addressing this problem requires a systematic numerical analysis using a consistent modeling methodology for a set of operating regimes within the low-flow range, followed by interpretation of the obtained results from the standpoint of hydrodynamic mechanisms responsible for loss formation.

3. Aim and Objectives of the Study

The aim of the study is to establish the regularities of variation of head and energy performance characteristics of a torque-flow pump in the low-flow range $Q = 0.05 - 0.6 Q_{nom}$ and to determine the features of internal flow structure transformation when transitioning from moderate to deep partial-load conditions.

To achieve the stated aim, the following objectives were defined:

1. To perform numerical simulation of the operating process of a torque-flow pump in a steady-state formulation for a set of operating regimes within the range $Q = 0.05 - 0.6 Q_{nom}$ using a consistent turbulence model.
2. To construct the head characteristic $H-Q$ and the energy characteristic $\eta-Q$ in the partial-load region and to determine the nature of energy performance degradation with decreasing flow rate.
3. To analyze the distributions of relative and absolute velocities in the interblade channels of the impeller and to identify changes in flow uniformity when transitioning to low-flow regimes.
4. To investigate the influence of impeller configuration (single-tier and double-tier) on the flow structure and the magnitude of hydraulic losses under partial-load operation.
5. To determine the rational operating limits of the pump in terms of maintaining an acceptable efficiency level and stability of the hydrodynamic flow structure.

4. Research Methodology

The object of the study is a torque-flow pump SVN 80-32 (pump capacity 80 m³/h, head 32 m at the design operating point) equipped with an impeller featuring curvilinear blade profiles and a free vortex chamber. Two impeller configurations were considered in the study, namely a single-tier and a double-tier design (Fig. 2).

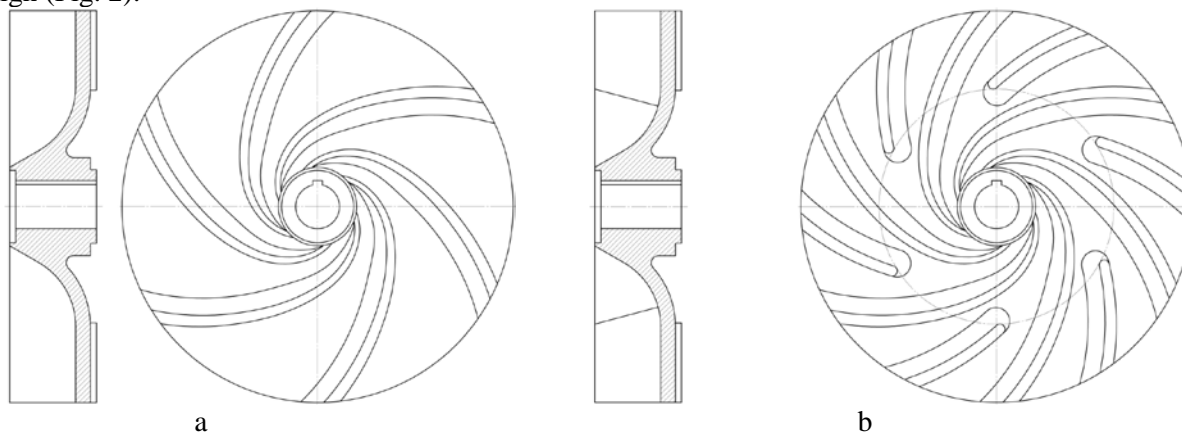


Fig. 2. Impeller configurations: a – single-tier; b – double-tier

The geometry of the casing and other elements of the flow passage was identical for both variants, ensuring a correct comparison of the obtained results and allowing assessment of the influence of impeller design features on hydrodynamic processes in the low-flow range.

The three-dimensional model of the flow passage was developed taking into account the inlet nozzle, the impeller region, the free vortex chamber, and the discharge volute. After the geometry was formed, the computational domain was generated for subsequent numerical simulation. Discretization was performed using an unstructured volumetric mesh with local refinement in regions of high velocity and pressure gradients, particularly near the walls of the stator and rotor elements. To ensure accurate boundary layer resolution, prism layers were generated in near-wall regions. Mesh quality was controlled using standard geometric criteria, and the number of elements was selected to ensure grid-independent integral results.

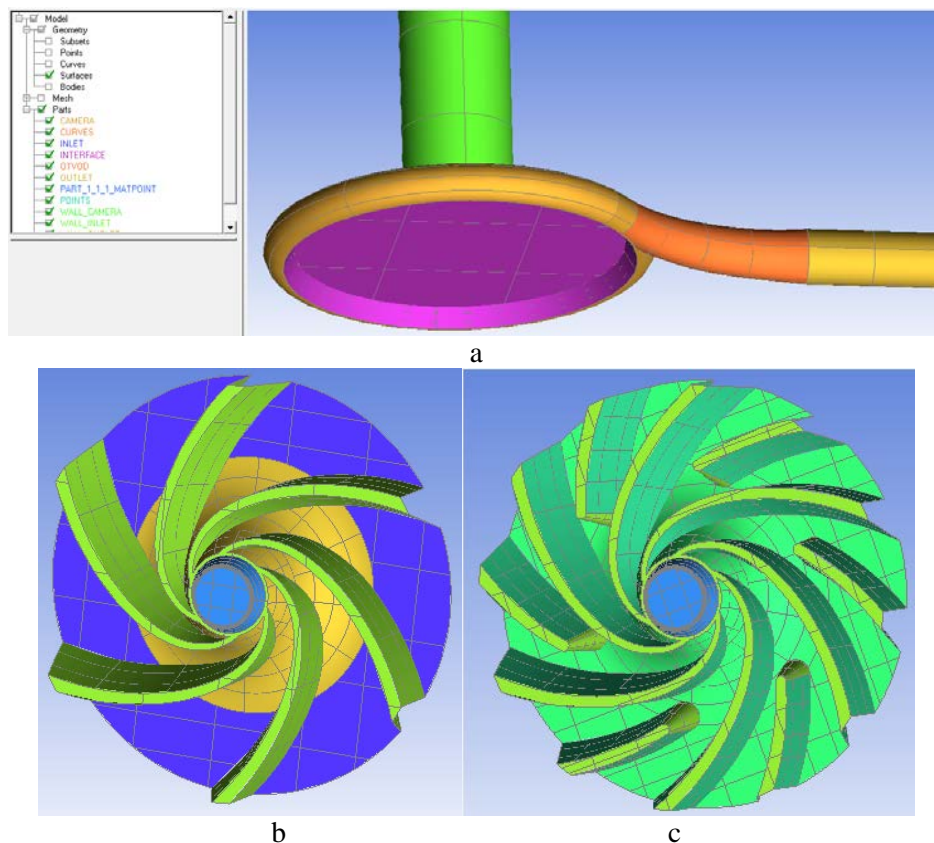


Fig. 3. Three-dimensional models of the flow passage of the investigated SVN 80-32 pump: a – stator element; b, c – rotor element

Numerical simulations were performed in the ANSYS CFX software environment using a steady-state formulation based on the Navier–Stokes equations for turbulent incompressible flow. A two-equation $k-\epsilon$ turbulence model was applied, which is widely used in engineering practice for the analysis of internal flows in pumping equipment and provides an acceptable balance between computational accuracy and cost. The interaction between the rotating and stationary parts of the model was accounted for using the Frozen Rotor approach. At the inlet of the computational domain, a mass flow rate corresponding to the investigated operating regime was specified, while static pressure was imposed at the outlet. No-slip and impermeability boundary conditions were applied on the walls. The working medium was considered as a homogeneous incompressible fluid with constant physical properties.

The simulations were carried out for operating regimes within the range $Q = 0.05-0.6 Q_{nom}$. For each regime, the total head, consumed power, and hydraulic efficiency were determined. Convergence of the numerical solution was controlled by monitoring the reduction of residuals and stabilization of integral parameters, in particular the head and shaft torque. The obtained results were used to construct the head characteristic H as a function of Q and the energy characteristic η as a function of Q in the partial-load zone.

To analyze the transformation of the flow structure, visualization of absolute and relative velocity fields was performed in characteristic cross-sections of the flow passage. Particular attention was paid to assessing the uniformity of velocity distribution in the interblade channels and the formation of recirculation

zones in the free vortex chamber as the flow rate decreased. The comparison of the two impeller configurations was carried out under identical boundary conditions, allowing an objective assessment of the influence of design execution on hydrodynamic and energy performance indicators under partial-load operation.

5. Research Results

5.1 Integral parameters of the torque-flow pump in the range $Q = 0.05\text{--}0.6 Q_{\text{nom}}$

The results of numerical simulation made it possible to determine the integral parameters of the SVN 80-32 pump in the low-flow region for both the single-tier and double-tier impeller configurations. The summarized data are presented in Table 1.

Table 1.

Integral parameters of the SVN pump with single-tier and double-tier impeller

Operating parameters	Single-tier impeller				Double-tier impeller			
	5	20	40	60	5	20	40	60
Flow rate, % Q_{nom}	5	20	40	60	5	20	40	60
Flow rate, m ³ /h	4	16	32	48	4	16	32	48
Total head, m	38.71	38.33	39.23	39.63	38.72	37.82	38.72	40.59
Hydraulic power, W	428.4	1727	3692	5661	424.9	1705	3590	5803.6
Consumed power, W	5751	7539.8	10562	13663	5409	7034	10279	13691
Hydraulic efficiency, %	7.4	22.9	35.0	41.4	7.9	24.2	34.9	42.4

Analysis of the obtained results indicates that in the flow rate range $Q = 0.05\text{--}0.6 Q_{\text{nom}}$ the total head varies only slightly for both impeller configurations. For the single-tier impeller, the head varies within 38.33–39.63 m, while for the double-tier impeller it ranges from 37.82 to 40.59 m. This behavior confirms the characteristic relatively flat head curve of torque-flow pumps in the partial-load region.

In contrast to the head, the efficiency demonstrates a pronounced dependence on flow rate. At $Q = 0.05 Q_{\text{nom}}$, the hydraulic efficiency for both configurations does not exceed 8 %, indicating intensive internal energy losses under deep partial-load conditions. As the flow rate increases to $0.6 Q_{\text{nom}}$, the efficiency rises to 41.4 % for the single-tier and 42.4 % for the double-tier configuration. Thus, increasing the flow rate is accompanied by an improvement in flow structure and a reduction in recirculation losses.

The consumed power of the pump increases regularly with increasing flow rate. For the single-tier impeller, it varies from 5.75 kW to 13.66 kW, while for the double-tier configuration it ranges from 5.41 kW to 13.69 kW. At the same time, hydraulic power remains relatively low at small flow rates, which results in low efficiency values in this region.

Figure 4 presents the dependencies of head, efficiency, and consumed power on the relative flow rate for both impeller configurations. Graphical analysis shows that the differences between the designs are most noticeable in the range $Q = 0.2\text{--}0.6 Q_{\text{nom}}$. The double-tier impeller provides slightly higher efficiency values in the upper part of the investigated range, which may be associated with a more uniform velocity distribution in the interblade channels.

At the same time, in the deep partial-load region the differences between the configurations become less pronounced, since the dominant factor is the prevalence of circulatory motion in the free vortex chamber.

5.2 Transformation of the Flow Structure in the Low-Flow Region

The hydrodynamic pattern within the pump flow passage was analyzed for four characteristic operating regimes in the range $Q = 0.6\text{--}0.05 Q_{\text{nom}}$. Visualization of the absolute velocity fields makes it possible to trace the sequential restructuring of the flow as the discharge decreases and to determine changes in the ratio between blade and vortex mechanisms of energy transfer.

Figures 5–7 present the velocity distribution in the flow passage at $Q = 0.6 Q_{\text{nom}}$.

For this regime, relatively uniform filling of the interblade channels and preservation of directed fluid motion from the inlet to the impeller outlet are characteristic. The vortex chamber participates in the formation of a circulatory flow; however, the blade mechanism of energy transfer remains dominant. Recirculation zones are local and do not occupy a significant volume of the chamber. The hydrodynamic structure is relatively stable, which corresponds to the acceptable efficiency level observed in this regime.

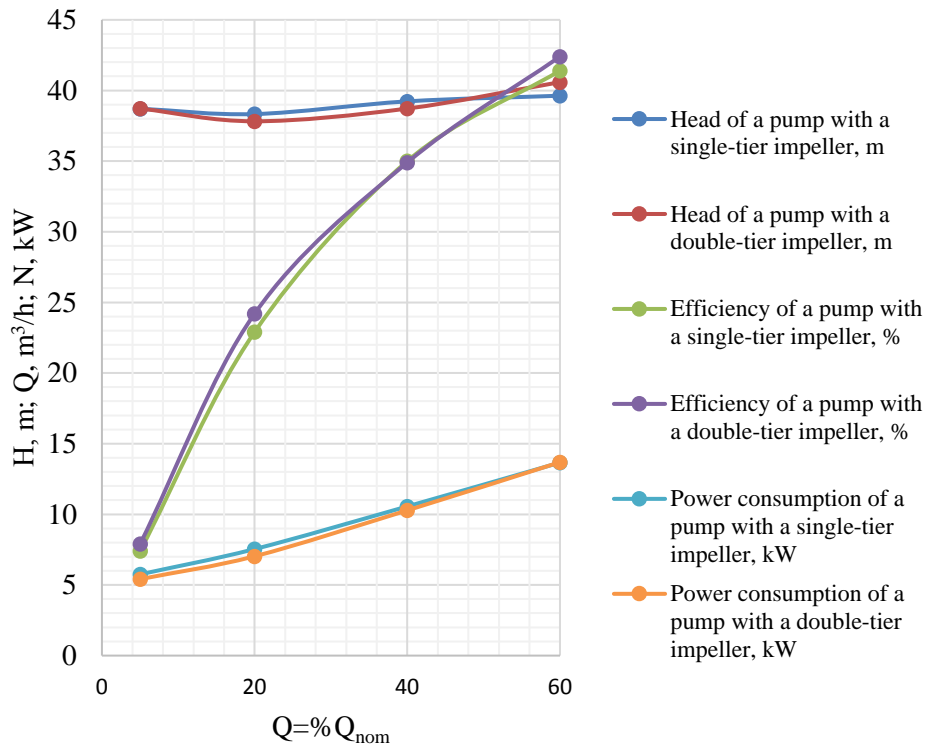


Fig. 4. Integral parameters of the SVN pump with single-tier and double-tier impellers

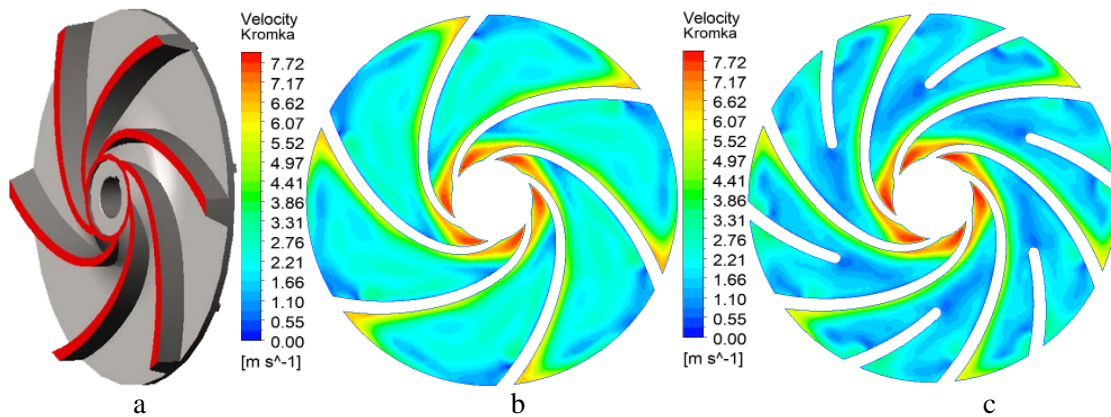


Fig. 5. Relative velocity in the interblade channels near the leading edge ($Q = 0.6 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

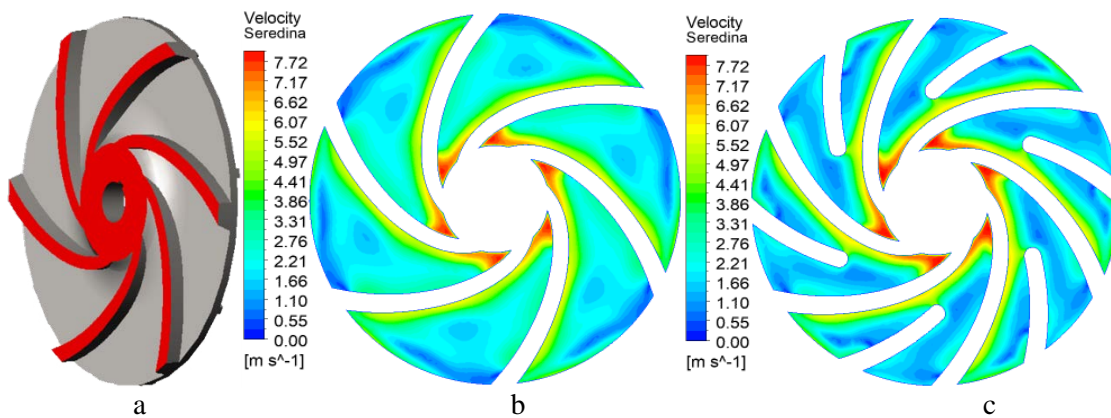


Fig. 6. Relative velocity in the interblade channels along the midline of the blade passage ($Q = 0.6 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

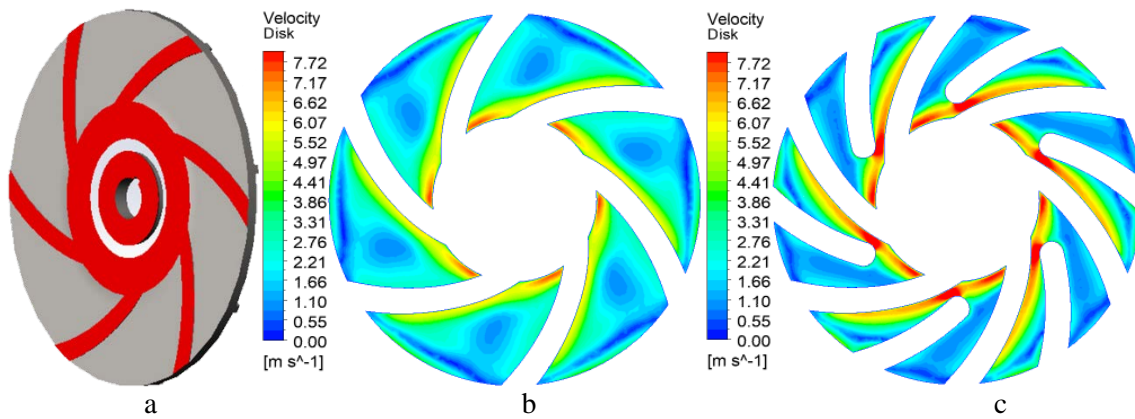


Fig. 7. Relative velocity in the interblade channels near the shroud ($Q = 0.6 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

When the flow rate decreases to $0.4 Q_{nom}$, as shown in Figures 8–10, an increase in the non-uniformity of velocity distribution in the interblade channels is observed. A portion of the flow begins to deviate from the main direction of motion, and the contribution of circulatory velocity components in the free vortex chamber increases. More extended low-velocity zones appear near the walls, indicating an increase in hydraulic losses. At the same time, the overall flow structure still retains a relatively ordered character.

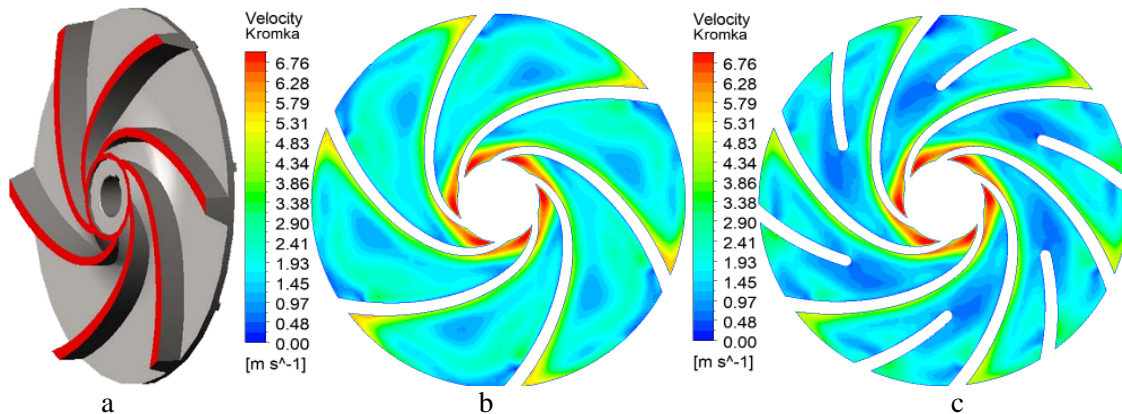


Fig. 8. Relative velocity in the interblade channels near the leading edge ($Q = 0.4 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

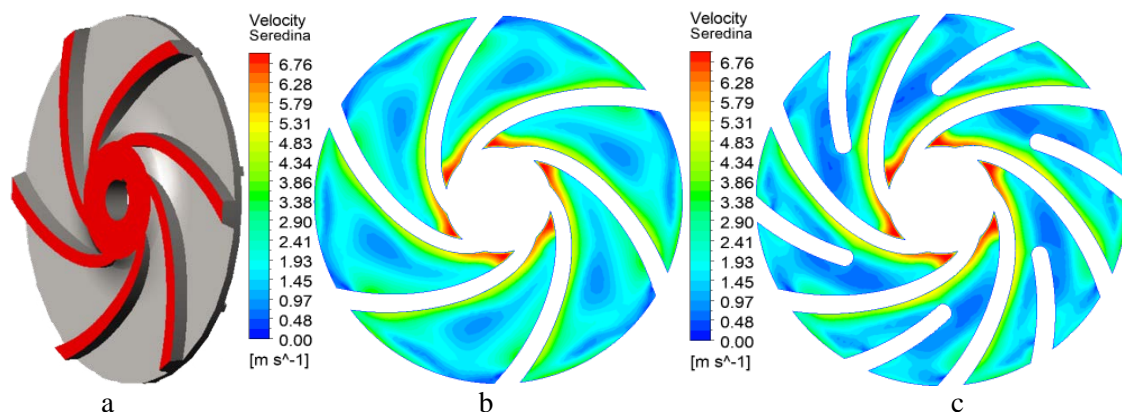


Fig. 9. Relative velocity in the interblade channels along the midline of the blade passage ($Q = 0.4 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

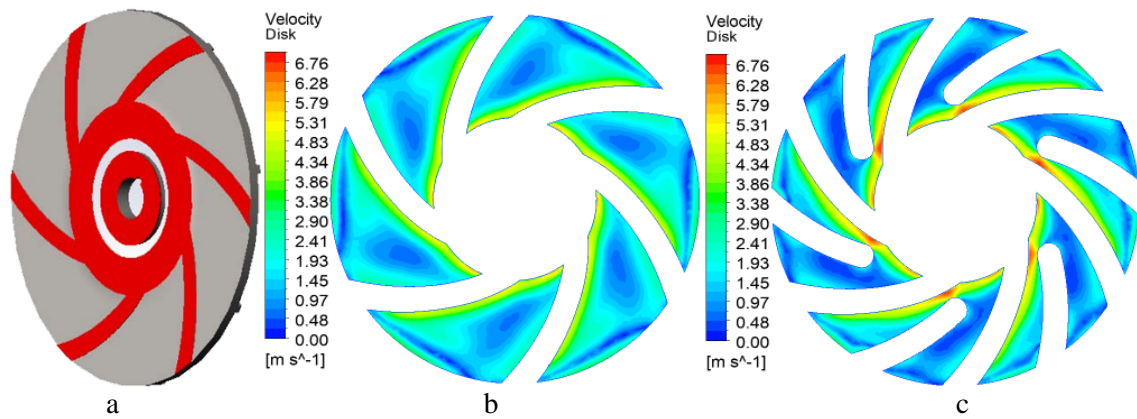


Fig. 10. Relative velocity in the interblade channels near the shroud ($Q = 0.4 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

Figures 11–13 show the velocity distribution at $Q = 0.2 Q_{nom}$. In this regime, a substantial restructuring of the flow occurs. The non-uniformity of the velocity field in the interblade channels increases sharply, and part of the vortex chamber volume becomes occupied by recirculation zones. The tangential velocity component increases, indicating an intensification of the vortex mechanism of energy transfer. The influence of the blades decreases, and energy transfer is predominantly achieved through circulatory motion within the chamber.

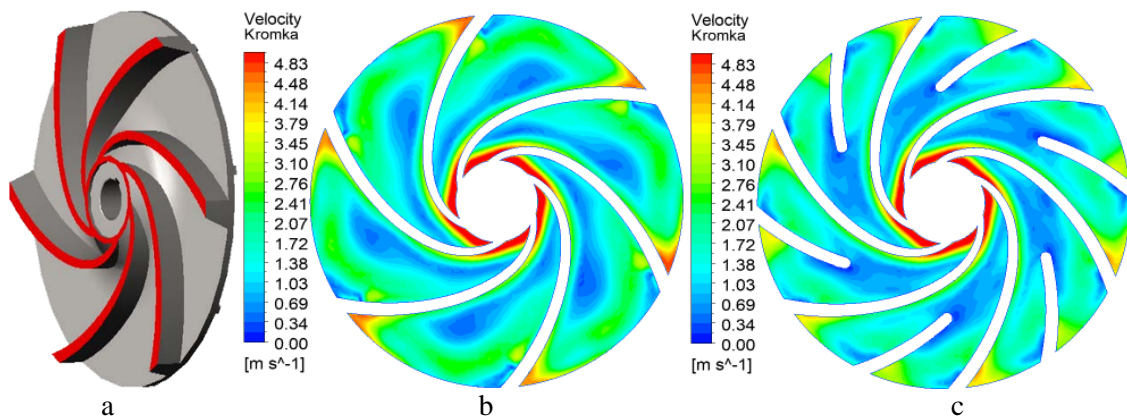


Fig. 11. Relative velocity in the interblade channels near the leading edge ($Q = 0.2 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

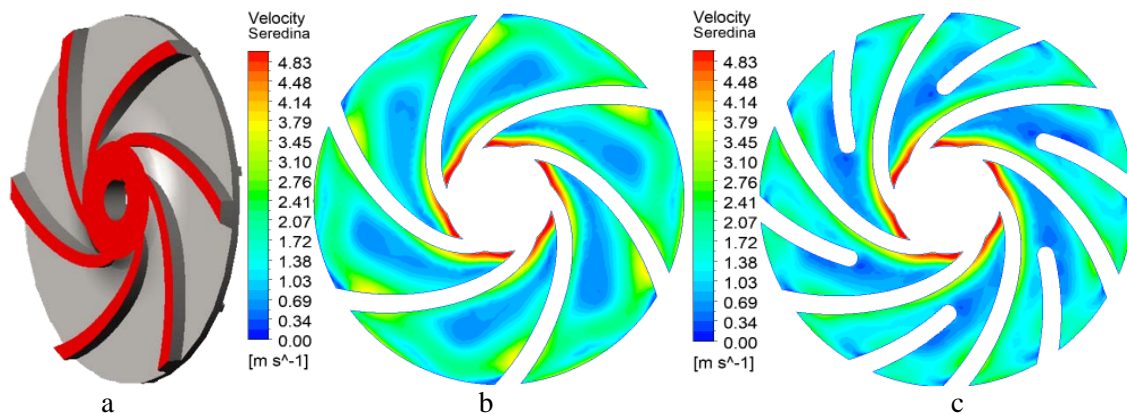


Fig. 12. Relative velocity in the interblade channels along the midline of the blade passage ($Q = 0.2 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

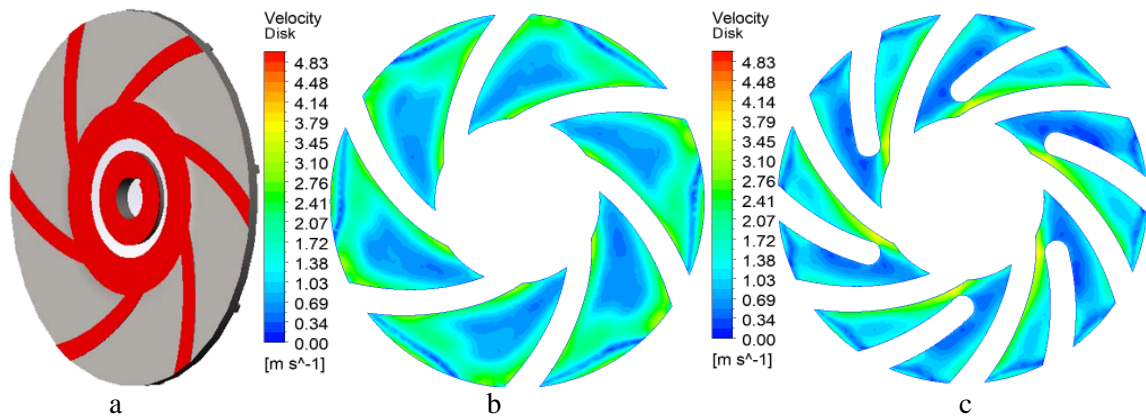


Fig. 13. Relative velocity in the interblade channels near the shroud ($Q = 0.2 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

It is at this tier that a sharp decline in energy performance indicators is observed, which is associated with intensified internal losses and partial flow separation.

The most pronounced changes in flow structure are recorded at $Q = 0.05 Q_{nom}$, as shown in Figures 14–16. The interblade channels are filled non-uniformly, and a significant portion of the fluid participates in internal recirculation. A stable toroidal vortex structure forms in the free vortex chamber, which effectively determines the nature of fluid motion within the pump. The blade mechanism of energy transfer loses its dominant role.

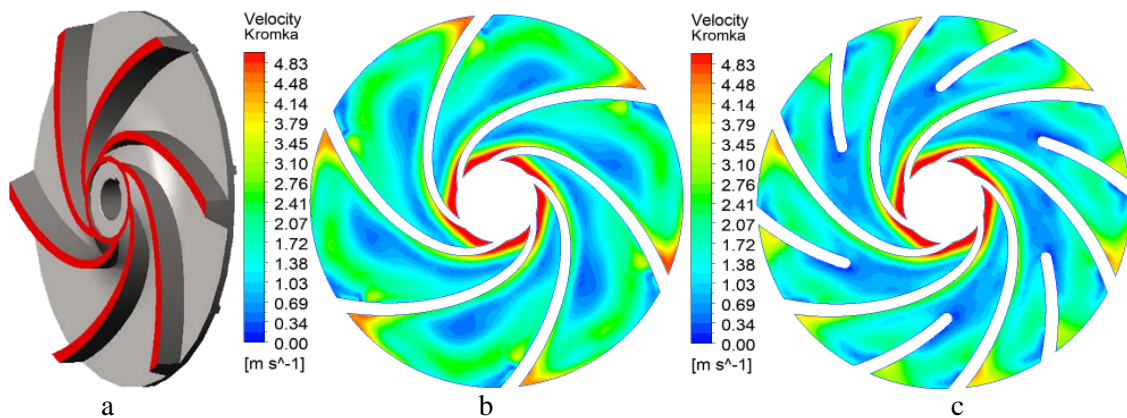


Fig. 14. Relative velocity in the interblade channels near the leading edge ($Q = 0.05 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

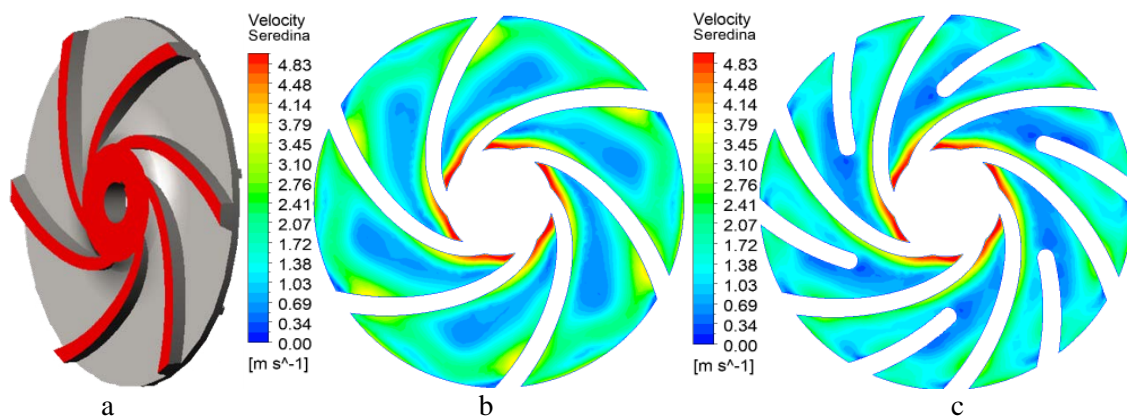


Fig. 15. Relative velocity in the interblade channels along the midline of the blade passage ($Q = 0.05 Q_{nom}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

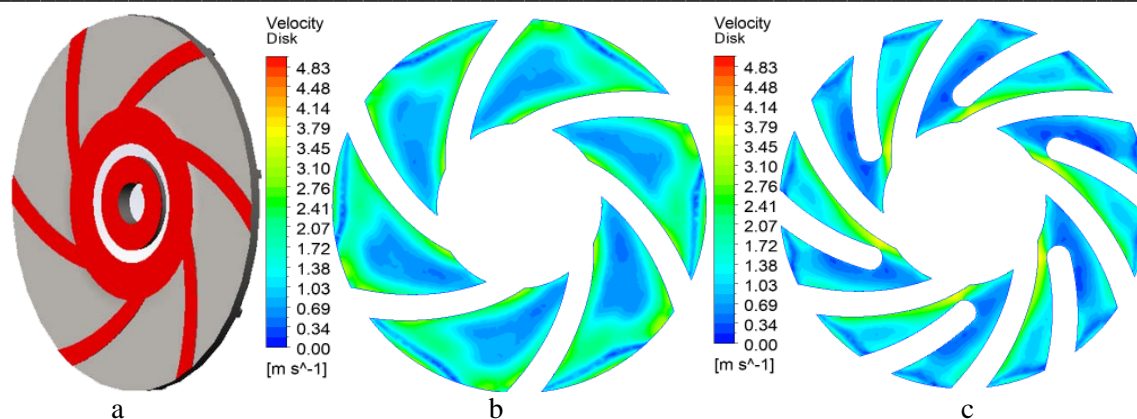


Fig. 16. Relative velocity in the interblade channels near the shroud ($Q = 0.05 Q_{\text{nom}}$): a – cross-section; b – single-tier impeller; c – double-tier impeller

Despite the relatively stable head, the efficiency of the operating process decreases significantly due to the increase in the volume of low-velocity zones and intensified energy dissipation.

6. Discussion

The obtained results confirm that, for a torque-flow pump operating in the low-flow region, relative stability of the head characteristic is maintained while energy performance indicators degrade significantly. A similar behavior has been reported in classical studies devoted to vortex pump analysis [6, 23], where the relatively flat shape of the $H(Q)$ curve was emphasized even under substantial deviation from the nominal regime. In the present study, it was established that within the range $Q = 0.05\text{--}0.6 Q_{\text{nom}}$, the head variation does not exceed several percent, indicating the dominance of the circulatory pressure generation mechanism in the free vortex chamber.

At the same time, the efficiency demonstrates a pronounced dependence on flow rate. Under deep partial-load conditions, a developed system of internal recirculation is formed, leading to increased dissipative losses and intensive redistribution of kinetic energy within the chamber. Similar trends of efficiency reduction under partial-load operation have been reported in CFD studies of vortex and combined pumps, where the role of increased tangential velocity components and non-uniform filling of interblade channels has been emphasized.

The comparison of single-tier and double-tier impellers showed that structural modification does not have a decisive influence on head in the deep partial-load region; however, it affects the uniformity of the velocity field and the magnitude of hydraulic losses in the upper part of the investigated range. This is consistent with studies of multi-tier and combined blade systems, where additional blade elements were shown to contribute to more uniform velocity distribution and reduced local diffusivity within the channels. In the present case, the double-tier configuration provides slightly higher efficiency at $Q \geq 0.4 Q_{\text{nom}}$, which can be explained by stabilization of blade inflow conditions and reduction in the scale of local flow separation.

Particular attention should be paid to the observed preservation of head at a substantial decrease in efficiency under the regime $Q = 0.05 Q_{\text{nom}}$. This indicates a fundamental shift in the pressure generation mechanism of the torque-flow pump under deep partial-load conditions. While near-nominal operation is governed primarily by blade-induced momentum exchange, deep partial-load regimes are characterized by volumetric vortex-dominated pressure generation within the free chamber. In this case, the impeller plays a secondary role, mainly sustaining circulation rather than directly transferring energy through blade loading. The formation of a stable toroidal vortex structure within the chamber creates a circulation loop that maintains the head level but is accompanied by significant energy losses due to turbulent dissipation.

From a practical standpoint, the obtained results are important for defining rational operating limits. Although the pump is capable of maintaining head even at 5 % of the nominal flow rate, prolonged operation under such conditions is energetically inefficient and potentially undesirable from a reliability perspective. Increased flow non-uniformity, local low-velocity zones, and intensified circulatory structures may create prerequisites for elevated vibration loading and local fluid overheating, which is consistent with approaches used in reliability assessment of pumping equipment.

At the same time, certain limitations of the present study should be noted. The simulations were performed in a steady-state formulation using the $k\text{--}\epsilon$ turbulence model, which does not fully capture unsteady pulsation phenomena characteristic of deep partial-load regimes. Further research may be directed toward the application of unsteady models or experimental validation of the obtained dependencies.

Overall, the results deepen the understanding of hydrodynamic mechanisms governing the operation of torque-flow pumps in the low-flow region and complement existing studies that are primarily focused on nominal regimes. The established regularities of flow structure transformation may be used to improve impeller design and to develop recommendations for the permissible operating range of pumps of this type.

7. Conclusions

A comprehensive numerical analysis of the operating process of the torque-flow pump SVN 80-32 in the low-flow range $Q = 0.05\text{--}0.6 Q_{\text{nom}}$ was carried out with comparison of two impeller configurations. The obtained results made it possible to establish the regularities of variation of integral characteristics and to identify the features of internal flow structure transformation under partial-load conditions.

1. It was established that the torque-flow pump SVN 80-32 in the range $Q = 0.05\text{--}0.6 Q_{\text{nom}}$ maintains a relatively stable head level, while energy performance indicators demonstrate a pronounced dependence on flow rate. The variation of total head within the investigated interval is insignificant, confirming the relatively flat shape of the $H(Q)$ characteristic in the partial-load region.

2. It was shown that under deep partial-load conditions, a sharp degradation of efficiency occurs due to increased internal hydraulic losses and the formation of developed recirculation zones in the free vortex chamber. At $Q = 0.05 Q_{\text{nom}}$, the hydraulic efficiency does not exceed 8 %, indicating the dominance of dissipative processes in the flow structure.

3. A regular transformation of the internal flow with decreasing discharge was revealed, from relatively ordered blade inflow at $Q = 0.6 Q_{\text{nom}}$ to the formation of a stable toroidal vortex structure in the chamber at $Q = 0.05 Q_{\text{nom}}$. In this case, the contribution of the tangential velocity component increases, while the role of the blade mechanism of energy transfer decreases.

4. It was established that the double-tier impeller provides a more uniform velocity distribution in the interblade channels and slightly higher efficiency values in the upper part of the investigated flow range. Under deep partial-load regimes, the differences between the configurations decrease, since the dominant factor becomes the nature of circulatory motion in the free chamber.

5. The obtained results make it possible to outline the limits of rational pump operation. Although head maintenance is possible even at 5 % of the nominal flow rate, from energy and operational perspectives it is advisable to operate at $Q \geq 0.4 Q_{\text{nom}}$, where an acceptable efficiency level and a more stable flow structure are ensured.

6. The study demonstrates that torque-flow pumps exhibit a dual-mechanism operating behavior, where the relative contribution of blade and vortex energy transfer mechanisms depends strongly on the flow regime. The identified transition zone provides a theoretical basis for optimizing impeller design and defining rational partial-load operating limits.

8. Acknowledgments

The study was conducted within the framework of the project “Innovative methods for predicting and improving the energy efficiency of torque-flow pumps for the resilience of energy systems” (state registration No. 0126U000718). The authors would like to thank the “International Association of Technological Development and Innovation” (IATDI) and the Public Union “Sumy Machine-Building Cluster of Energy Efficiency” (SMBCEEQ) for their support in conducting the study.

List of References:

- Schivley, G. P., and Dussourd, J. L. (1970). An Analytical and Experimental Study of a Vortex Pump. *ASME. J. Basic Eng.* December 1970; 92(4): 889–900. <https://doi.org/10.1115/1.3425161>
- Mihalić, T., Guzović, Z., and Predin, A. (2013). Performances and Flow Analysis in the Centrifugal Vortex Pump. *ASME. J. Fluids Eng.* January 135(1), 011107. <https://doi.org/10.1115/1.4023198>
- Gerlach, A., Thamsen, P., Wulff, S. & Jacobsen, C. (2017). Design Parameters of Vortex Pumps: A Meta-Analysis of Experimental Studies. *Energies*, 10 (1), 58. <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/1/58/htm>
- Gerlach, A., Thamsen, P. & Lykholt-Ustrup, F. (2016). Experimental Investigation on the Performance of a Vortex Pump using Winglets. *ISROMAC 2016. International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*. http://isromac-isimet.univ-lille1.fr/upload_dir/finalpaper/181.finalpaper.pdf
- Gao, X.; Zhao, T.; Shi, W.; Zhang, D.; Shi, Y.; Zhou, L.; Chang, H. (2020). Numerical Investigation of an Open-Design Vortex Pump with Different Blade Wrap Angles of Impeller. *Processes*. 8, 1601. <https://doi.org/10.3390/pr8121601>
- Quan H, Guo Y, Li R, Su Q, Chai Y. (2019). Optimization design and experimental study of vortex pump based on orthogonal test. *Science Progress*. 103(1). <https://doi.org/10.1177/0036850419881883>

7. Zhou, L.; Zhou, C.; Bai, L.; Agarwal, R. (2024). Numerical and Experimental Analysis of Vortex Pump with Various Axial Clearances. *Water*, 16, 1602. <https://doi.org/10.3390/w16111602>
8. Runmei, M.; Kuisheng, W. (2009). Modeling of Pumping Performance of Labyrinth Screw Pump (LSP) by 2D Reynolds Stress Equations. *J. Fluids Eng.* 131(8): 085001. <https://doi.org/10.1115/1.3129128>
9. Li, W. (2025) Performance of vortex pump in CFD simulations with rough walls. *International Journal of Fluid Engineering* 2, 013902. <https://doi.org/10.1063/5.0237732>
10. Wu, X.; Shao, C.; Tan, M.; Liu, H. et al (2024). Unsteady flow and excitation characteristics in a vortex pump. *Flow Measurement and Instrumentation*, 100, 102716. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102716>
11. Sreekanth M, Sivakumar R, Sai Santosh Pavan Kumar M, Karunamurthy K, Shyam Kumar M, Harish R. (2021). Regenerative flow pumps, blowers and compressors – A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 235(8), 1992-2013. <https://doi.org/10.1177/09576509211018118>
12. Bhattacharjee, P., Hussain, S.A.I., Dey, V. (2023). Failure mode and effects analysis for submersible pump component using proportionate risk assessment model: a case study in the power plant of Agartala. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Vol. 14, pp. 1778–1798 <https://doi.org/10.1007/s13198-023-01981-6>
13. Makivskyi O., Kondus V., Pitel J., Sotnyk M., Andrusiak V., Polkovnychenko V., Musthai M. (2024). The influence of the design features of the submersible pump rotor on the vibration reliability. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 11(1), pp. D1–D9. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).d1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).d1)
14. Dehghan, A., Shojaeefard, M., Roshanaei, M. (2024) Exploring a new criterion to determine the onset of cavitation in centrifugal pumps from energy-saving standpoint; experimental and numerical investigation. *Energies*, Vol. 293, 130681. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2024.130681>
15. Dehnavi, E., Danlos, A., Solis, M., Kebdani, M., Bakir, F. (2024). Study on the pump cavitation characteristic through novel independent rotation of inducer and centrifugal impeller in co-rotation and counter-rotation modes. *Physics of Fluids*, Vol. 36(1), pp. 015120. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0182731>
16. Aliuly, A.; Amanzholov, T.; Seitov, A.; Momysh, N.; Jaichibekov, N.; Kaltayev, (2024). A Hydraulic Design and CFD-Based Parametric Study for Optimizing Centrifugal Pump Impeller Performance. *Appl. Sci.* 14, 10161. <https://doi.org/10.3390/app142210161>
17. Wang, M.; Li, Y.; Yuan, J.; Yuan, S. (2021). Effects of different vortex designs on optimization results of mixed-flow pump. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 16(1), 36–57. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.2006091>
18. Liu, L.; Zhu, B.; Bai, L.; Liu, X.; Zhao, Y. (2017) Parametric Design of an Ultrahigh-Head Pump-Turbine Runner Based on Multiobjective Optimization. *Energies*, 10, 1169. <https://doi.org/10.3390/en10081169>
19. Kondus, V.; Kotenko A. (2017). Investigation of the impact of the geometric dimensions of the impeller on the torque flow pump characteristics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1/4 (88), pp. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107112>
20. Kondus, V.; Kalinichenko, P.; Gusak, O. (2018) A method of designing of torque-flow pump impeller with curvilinear blade profile. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3/8 (93), 29–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131159>
21. Panchenko, V., German, V., Ivchenko, O., Ryasnaya, O. (2021). Combined operating process of torque flow pump. *Journal of Physics: Conference series*, Vol. 1741 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012022>
22. Rogovyi, A., Korohodsky, V., Medviedev, Y. (2021). Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. *Energy*, 218, 119432. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119432>
23. Gusak, O., Krishtop, I., German, V., Baga, V. (2017). Increase of economy of torque flow pump with high specific speed. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 233 012004. Retrieved from <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012004>

Reviewer: Oleksandr Ivchenko, Head of the Department of technical systems design of the Sumy National Agrarian University, Ph.D., associate professor

Дата надходження статті до видання: 20.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

© Кондусь В. Ю., Куліков О. А., Андрусяк В. О., Муштай М. В.,
Твердохлеб А. С., Дідик А. М.

Б. Ю. Мокряк¹[\[0009-0006-8990-4226\]](#), Р. В. Зінько¹[\[0000-0002-3275-8188\]](#), Н.А. Тарасов¹[\[0000-0003-1870-3436\]](#),
Р. Я. Качмар¹[\[0000-0002-5440-6853\]](#), Р.В. Панечко²

Національний університет «Львівська політехніка»¹
Ковельський промислово-економічний фаховий коледж Луцького національного технічного
університету²

ДІАГНОСТИКА АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ НА СТИСНеноМУ ПОВІТРІ З ВИКОРИСТАННЯМ ШІ

Ефективна діагностика технічного стану автомобіля забезпечує його надійність та продуктивність під час виконання транспортних процесів. Сучасні інформаційні технології та методи обробки даних дають змогу виявляти та прогнозувати потенційні несправності на ранніх етапах їх виникнення, що сприяє підвищенню безпеки дорожнього руху та зменшенню витрат на технічне обслуговування.

У роботі проведено аналіз методів і моделей, що застосовуються в інформаційних системах діагностики двигунів, які працюють на стисненому повітрі. Розглянуто можливість використання алгоритмів машинного навчання для обробки даних сенсорів та виявлення несправностей у роботі двигуна. Запропоновано структуру інформаційного забезпечення системи діагностики, що включає реляційну базу даних та моделі машинного навчання, реалізовані на платформі TensorFlow.

Показано можливість застосування методів класифікації, регресії та аналізу аномалій для визначення технічного стану елементів двигуна та прогнозування їхнього ресурсу. Запропонований підхід дозволяє автоматизувати процес діагностики, підвищити точність визначення несправностей і забезпечити інтеграцію системи з телекомунікаційними та хмарними сервісами.

Ключові слова: діагностика автомобіля, двигуни на стисненому повітрі, машинне навчання, штучний інтелект, реляційна база даних, TensorFlow.

B. Yu. Mokriak, R. V. Zinko, N. A. Tarasov, R. Ya. Kachmar, R. Panechko

DIAGNOSTICS OF COMPRESSED AIR CAR ENGINES USING AI

Effective diagnostics of the technical condition of a vehicle ensures its reliability and productivity during the performance of transport processes. Modern information technologies and data processing methods make it possible to detect and predict potential malfunctions at the early stages of their occurrence, which contributes to increasing road safety and reducing maintenance costs.

The paper analyzes the methods and models used in information systems for diagnosing engines operating on compressed air. The possibilities of using machine learning algorithms for processing sensor data and detecting engine malfunctions are considered. The structure of the information support of the diagnostic system is proposed, which includes a relational database and machine learning models implemented on the TensorFlow platform.

The possibility of using classification, regression and anomaly analysis methods to determine the technical condition of engine elements and predict their resource is shown. The proposed approach allows you to automate the diagnostic process, increase the accuracy of fault detection and ensure system integration with telecommunication and cloud services.

Keywords: car diagnostics, compressed air engines, machine learning, artificial intelligence, relational database, TensorFlow.

Вступ. Своєчасна діагностика технічного стану автомобіля забезпечує його високу ефективність та надійність. Поява нових інформаційних технологій та методів обробки даних дозволяють виявляти та прогнозувати потенційні несправності ще до їх виникнення, і цим запобігати аваріям, зменшувати витрати на ремонт.

Зараз автомобілі оснащуються значною кількістю сенсорів та електронних системам, які дають можливість постійного моніторингу його технічного стану. Дані, що надходять з цих сенсорів, використовуються для діагностики, прогнозування поломок та прийняття рішень щодо обслуговування. У дослідженні розглянуто методи машинного навчання, що аналізують великі обсяги даних, виявляють приховані залежності та формують прогнози щодо стану транспортного засобу.

Застосування методів машинного навчання дає нові можливості для покращення точності діагностики, зменшення часу на виявлення поломок та підвищення надійності автомобіля. Так алгоритми класифікації та регресії допомагають в ідентифікації та оцінці міри зношення складових двигуна, а методи кластеризації виявляють аномальні поведінкові патерни, що свідчать про можливі негативні тенденції в роботі двигуна.

Огляд. Новітні технології у сфері автомобільної діагностики мають значний потенціал для покращення якості діагностики [1,2]. Використання додаткових датчиків дозволяє збирати більше даних про стан автомобіля, що підвищує точність аналізу. Алгоритми машинного навчання здатні обробляти великі обсяги даних та виявляти складні закономірності, що допомагає у точному

визначенні несправностей. Автоматизація процесу діагностики за допомогою штучного інтелекту та IoT технологій дозволяє значно прискорити процес та зменшити вплив людського фактору.

Основна перевага методу глибокого навчання полягає в його здатності автоматично виявляти складні залежності в даних без необхідності ручної інженерії ознак [3,4]. Це дозволяє скоротити час на підготовку даних та підвищити точність результатів. Глибокі нейронні мережі, такі як багатошарові перцептрони, згорткові нейронні мережі та рекурентні нейронні мережі, можуть навчатися на необроблених даних і самостійно виділяти значущі ознаки [5].

Програмне забезпечення для діагностики автомобілів було розроблено для роботи на операційній системі Windows, яка є однією з найпоширеніших у світі [6].

MySQL є реляційною системою управління базами даних з відкритим кодом [7]. Вона залишається однією з найпопулярніших баз даних у веб-додатках: більшість CMS використовують саме MySQL, і майже всі веб-фреймворки підтримують її на рівні базової конфігурації. Основні переваги MySQL включають простоту використання, гнучкість, низьку вартість володіння (у порівнянні з платними СУБД), масштабованість і високу продуктивність.

Сучасні інформаційні системи діагностики активно використовують хмарні технології та інтернет речей (IoT), що дає можливість здійснювати віддалений моніторинг транспортних засобів у режимі реального часу.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері автомобільної діагностики, питання використання машинного навчання для двигунів на стисненому повітрі досліджені недостатньо та потребують подальшого розвитку.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розроблення підходу до діагностики автомобільних двигунів на стисненому повітрі із використанням технологій штучного інтелекту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні методи діагностики автомобільних двигунів.
2. Визначити параметри, які можуть використовуватись для моніторингу роботи двигуна на стисненому повітрі.
3. Розробити структуру інформаційної системи діагностики.
4. Запропонувати модель обробки даних із використанням алгоритмів машинного навчання.
5. Реалізувати приклад інформаційного забезпечення у вигляді реляційної бази даних.

Основний виклад матеріалу. Головне завдання всіх алгоритмів сучасних бортових засобів діагностики технічного стану прямо чи опосередковано полягає у визначенні факторів сили у контакті колеса з опорною поверхнею, тому їхнє пряме вимірювання спростить алгоритм керування, а отже, підвищить ефективність роботи автоматичних систем і знизить їхню вартість.

Побудові діагностичного алгоритму передують розробка блок-схеми структурних і наслідкових ланок уздовж ланцюга: діагностований об'єкт — одиниця — система, механізм — елемент — структурний параметр — несправність — зовнішній знак (симптом) — діагностичний параметр. Кожне зв'язок визначає рівень пошуку або технологічного кроку, спрямованого на встановлення несправності. Загалом, етапи розробки діагностичного алгоритму наведені у таблиці 1.

Табл. 1

Етапи розробки алгоритму узагальненої діагностики

Етапи розробки алгоритму	Рівень пошуку	Структурно-наслідковий зв'язок	Метод реалізації
АНАЛІЗ	1	Визначення загального технічного стану автомобіля	Інструментальна та технологічна
	2	Моніторинг основних блоків і систем автомобіля	
	3	Усунення несправностей компонентів, механізмів і систем окремих блоків	
	4	Моніторинг компонентів діагностованого механізму	
	5	Огляд інтерфейсів і елементів з найнижчими значеннями показників надійності експлуатації	
	6	Моніторинг структурних параметрів	
	7	Моніторинг можливих несправностей елементів і інтерфейсів	
СИНТЕЗ	8	Визначення списку зовнішніх ознак, прояв яких визначає конкретну несправність	Інформаційна та аналітична
	9	Визначення попереднього списку можливих діагностичних параметрів	

Сучасний рівень розвитку телекомунікаційних технологій дозволяє ефективно передавати великі обсяги інформації в реальному часі, що відкриває можливості для віддаленої діагностики та контролю транспортних засобів, у тому числі в автоматичному режимі [8-14]. У цьому випадку діагностика здійснюється віддаленим сервером на основі накопичених і оперативних даних.

Використання штучного інтелекту (ШІ) для діагностики автомобільного двигуна на стисненому повітрі з поршневым механізмом відкриває нові можливості для точного і швидкого виявлення несправностей (рис.1). Методика дослідження:

Методика дослідження базується на використанні сучасних інформаційних технологій збору та обробки даних.

Основні етапи дослідження включають:

1. **Збір даних** з датчиків двигуна:
 - тиск у системі стисненого повітря;
 - температура компонентів;
 - вібраційні параметри;
 - акустичні сигнали;
 - витрати повітря.
2. **Обробка та підготовка даних**
 - очищення від шумів;
 - нормалізація параметрів;
 - формування навчальних та тестових вибірок.
3. **Моделювання технічного стану двигуна**
 - застосування алгоритмів машинного навчання;
 - аналіз часових рядів;
 - виявлення аномалій.
4. **Розроблення інформаційної системи**
 - створення реляційної бази даних;
 - інтеграція з алгоритмами машинного навчання на платформі TensorFlow.

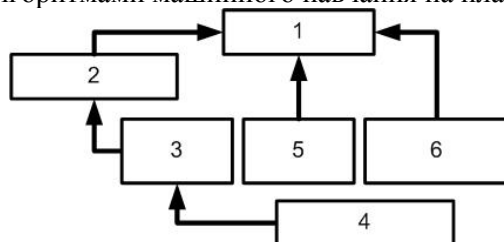


Рис. 1. Комплексна діагностика автомобільних двигунів на стисненому повітрі:
1 – Експертна система; 2 – Телекомунікаційні засоби зв'язку 3 – Бортова система діагностики 4 – Діагностика гальмівної системи 5 – Стендова діагностика 6 – Дорожні випробування

Платформа TensorFlow є одним із найпопулярніших інструментів для реалізації машинного навчання (ML) і штучного інтелекту (ШІ). Вона надає інструменти для побудови, навчання і розгортання моделей машинного навчання, які можна використовувати для діагностики автомобільного двигуна на стисненому повітрі. TensorFlow можна застосувати для діагностики двигунів, що працюють на стисненому повітрі.

1. Збір та підготовка даних

TensorFlow потребує якісних даних для навчання моделей, тому першим етапом є створення датасету.

1.1. Джерела даних

- Датчики двигуна:
 - Тиск у системі стисненого повітря.
 - Вібрація поршневого механізму.
 - Температура компонентів.
 - Час відкриття/закриття клапанів.
 - Витрати повітря.
- Акустичні дані:
 - Звуки роботи двигуна, записані мікрофонами.

- Зображення та відео:
 - Фото та відео візуального стану компонентів (корпус, поршні, ущільнення, клапани).
- Історичні дані:
 - Логи попередніх несправностей і ремонтів.
 - Записи сервісного обслуговування.

1.2. Підготовка даних

- Очищення даних:
 - Видалення шумів, пропущених значень та аномалій у даних.
- Форматування:
 - Перетворення даних у потрібний формат для TensorFlow, наприклад, тензори (багатовимірні масиви чисел).
- Аугментація даних (за потреби):
 - Збільшення обсягу даних, наприклад, створення нових зразків із невеликими варіаціями (змінення частоти вібрацій, штучне додавання шумів).
- Розподіл даних:
 - Розділення на тренувальні (70-80%), тестові (10-15%) і валідаційні (10-15%) набори.

2. Створення моделі машинного навчання

TensorFlow надає інструменти для побудови різних типів моделей ML, які можна адаптувати до задачі діагностики.

2.1. Вибір типу моделі

- Класифікація:
 - Використовується для визначення типу несправності двигуна (наприклад, витік повітря, знос поршнів, проблеми з клапанами).
- Регресія:
 - Для прогнозування кількісних показників, таких як залишковий ресурс компонентів (кількість циклів до зносу).
- Аналіз аномалій:
 - Використовується для виявлення відхилень від нормальної роботи (наприклад, нестандартні звуки, вібрація чи тиск).
- Обробка сигналів:
 - Для роботи з часо-частотними сигналами, такими як вібрації чи акустичні профілі, можна використовувати згорткові нейронні мережі (CNN).
- Робота з послідовностями:
 - Для аналізу часових рядів (даних, що змінюються з часом), наприклад, змін тиску чи температури, застосовують рекурентні нейронні мережі (RNN) або моделі типу LSTM (Long Short-Term Memory) (рис. 2).

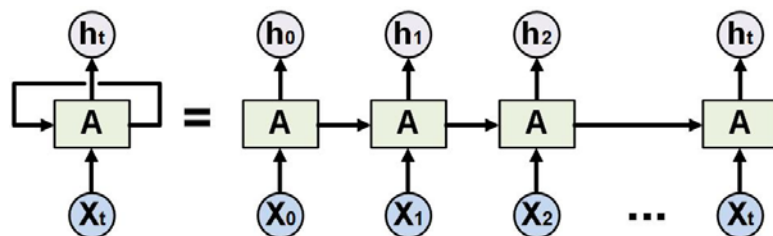


Рис. 2. Структурно-функціональна схема рекурентної нейронної мережі

2.2. Математична постановка задач діагностики двигуна

Формування вектора діагностичних параметрів

Робота двигуна на стисненому повітрі характеризується набором вимірюваних параметрів, які формують вектор ознак:

$$x = [p, T, \omega, v, a] \quad (1)$$

де $p(t)$ – тиск у системі стисненого повітря; $T(t)$ – температура вузлів двигуна; $v(t)$ – вібраційні параметри; $q(t)$ – витрати повітря; $a(t)$ – акустичні характеристики.

Тоді множина діагностичних даних визначається як

© Б. Ю. Мокряк, Р. В. Зінько, Н.А. Тарасов, Р. Я. Качмар, Р.В. Панечко

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + v_k\end{aligned}\quad (2)$$

1. Задача класифікації технічного стану

Задача класифікації полягає у визначенні типу технічного стану двигуна на основі вимірних параметрів.

Нехай $y \in C$, де $C = \{c_1, c_2, \dots, c_K\}$ – множина можливих станів двигуна.

Наприклад:

c_1 – нормальний режим роботи

c_2 – витік повітря

c_3 – знос поршневого механізму

c_4 – несправність клапанного механізму

Модель машинного навчання реалізує відображення $f_0: \mathbb{R}^m \rightarrow C$, де θ – параметри нейронної мережі.

Для нейронної мережі з функцією Softmax імовірність належності до класу визначається:

$$P(y = k | x) = \frac{\exp(z_k)}{\sum_{j=1}^K \exp(z_j)} \quad (3)$$

де z_k – вихідний сигнал нейрона для класу k .

Функція втрат для навчання моделі:

$$L = - \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K y_{ik} \log P(y = k | x_i) \quad (4)$$

де y_{ik} – індикатор належності зразка i до класу k .

2. Задача регресії (прогнозування ресурсу)

Для оцінювання технічного стану елементів двигуна може використовуватись регресійна модель, яка прогнозує залишковий ресурс.

Нехай

$$R = f(x) \quad (5)$$

де R – прогнозований залишковий ресурс компонента (кількість циклів або час роботи до відмови).

У разі використання нейронної мережі модель задається як:

$$R = f_0(x) \quad (6)$$

Навчання виконується шляхом мінімізації квадратичної помилки:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - \hat{R}_i)^2 \quad (7)$$

де R_i – фактичний ресурс; \hat{R}_i – прогноз моделі.

3. Задача виявлення аномалій

Аналіз аномалій дозволяє виявляти відхилення від нормальної роботи двигуна.

Нехай x_n – вектор параметрів нормального режиму роботи. Будується модель $g(x)$, яка описує нормальний стан системи. Аномалія визначається за величиною відхилення

$$D(x) = |x - g(x)| \quad (8)$$

Якщо $D(x) > \delta$ то стан двигуна вважається аномальним.

У випадку використання автокодера функція помилки реконструкції:

$$E = |x - \hat{x}|^2 \quad (9)$$

де \hat{x} – реконструйований вектор ознак.

Якщо $E > E_{thr}$ то фіксується можлива несправність двигуна.

4. Аналіз часових рядів параметрів двигуна

Оскільки параметри двигуна змінюються у часі, їх можна описати послідовністю станів:

$$X = \{x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_T)\} \quad (10)$$

Для аналізу таких даних застосовуються рекурентні нейронні мережі (RNN / LSTM).

Модель LSTM визначається рівняннями:

$$h_t = \sigma(W_h x_t + U_h h_{t-1} + b_h) \quad (11)$$

де h_t – прихований стан мережі; x_t – вхідні параметри двигуна; σ – нелінійна функція активації. Отриманий прихований стан використовується для прогнозування технічного стану:

$$y_t = W_y h_t + b_y \quad (12)$$

Узагальнена модель системи діагностики. У загальному вигляді задача інтелектуальної діагностики може бути представлена як

$$y = F(X, \theta) \quad (13)$$

де X – множина вимірних параметрів двигуна; θ – параметри моделі машинного навчання; y – оцінка технічного стану двигуна.

Приклад розробленого елемента інформаційного забезпечення – реляційна база даних, яка включає 7 сутностей наведено на рис.3. Кожна сутність пов'язана з іншими за допомогою зв'язків типу один-до-багатьох. Типи зв'язків наведені у таблиці 2. Таблиця 3 містить опис атрибутів сутностей.

Табл. 2

Відомості про типи сутностей

Ім'я сутності	Визначення
Status	Інформація про статуси діагностик
Users	Інформація про користувача
Auto	Інформація про автомобіль
Diagnostic	Інформація про діагностику
Owner	Інформація про власника авто
Detals	Інформація про датчики двигуна
Detector	Інформація про датчики трансмісії

Табл. 3

Відомості про типи зв'язків

Тип сутності 1	Тип зв'язку 2	Тип сутності 3	Кардинальність 4
Status	входить до	Diagnostic	1:M
Users	входить до	Diagnostic	1:M
Auto	входить до	Detals	1:M
Owner	входить до	Auto	1:M
Detals	входить до	Detector	1:M

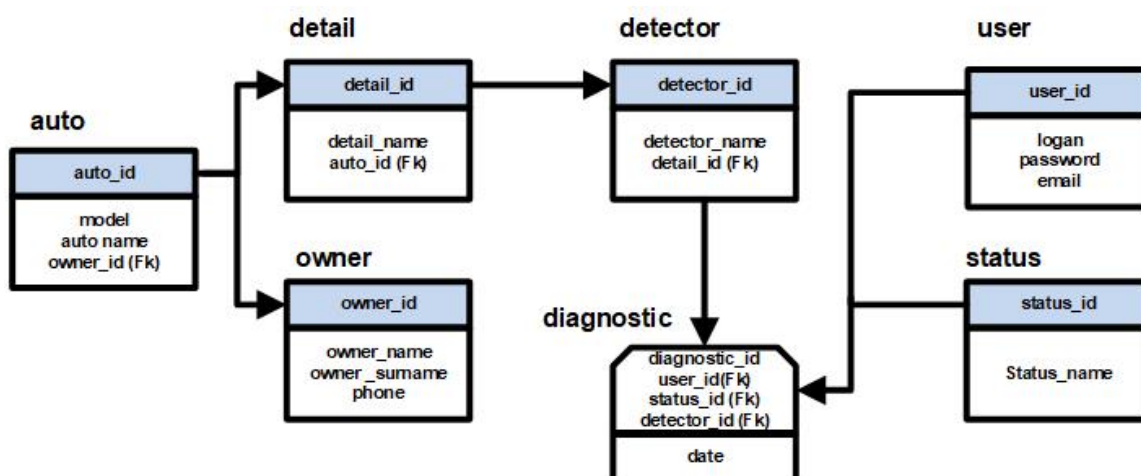


Рис. 3. Схема логічної моделі даних задачі

```

Фрагмент коду для реляційної бази даних
// backend/models/index.js
const { Sequelize, DataTypes } = require('sequelize');
const sequelize = new Sequelize('database', 'user', 'password', {
  host: 'localhost',
  dialect: 'mysql',
});
const Status = sequelize.define('Status', {
  name: { type: DataTypes.STRING, allowNull: false }
});
    
```

```

const Users = sequelize.define('Users', {
  name: { type: DataTypes.STRING, allowNull: false },
  email: { type: DataTypes.STRING, unique: true, allowNull: false }
});
const Auto = sequelize.define('Auto', {
  model: { type: DataTypes.STRING, allowNull: false },
  year: { type: DataTypes.INTEGER }
});
const Diagnostic = sequelize.define('Diagnostic', {
  description: { type: DataTypes.TEXT }
});
const Owner = sequelize.define('Owner', {
  name: { type: DataTypes.STRING, allowNull: false }
});
const Details = sequelize.define('Details', {
  name: { type: DataTypes.STRING, allowNull: false }
});
const Detector = sequelize.define('Detector', {
  type: { type: DataTypes.STRING, allowNull: false }
});
// Визначення зв'язків
Status.hasMany(Diagnostic);
Diagnostic.belongsTo(Status);
Users.hasMany(Diagnostic);
Diagnostic.belongsTo(Users);
Owner.hasMany(Auto);
Auto.belongsTo(Owner);
Auto.hasMany(Details);
Details.belongsTo(Auto);
Details.hasMany(Detector);
Detector.belongsTo(Details);
sequelize.sync({ force: true })
  .then(() => console.log('Database & tables created!'))
  .catch(error => console.log(error));
module.exports = { Status, Users, Auto, Diagnostic, Owner, Details, Detector };

```

3. Навчання моделі

Навчання моделі проводиться на тренувальному наборі даних.

3.1. Процес навчання

- Передача даних у модель:
- Можливості TensorFlow:
 - Автоматична зупинка навчання при досягненні оптимального результату.
 - Регуляризація для запобігання перенавчанню.

3.2. Оцінка моделі

4. Застосування моделі в реальному часі

Після навчання модель можна використовувати для діагностики двигуна в реальному часі.

4.1. Інтеграція з датчиками

- Підключення моделі до системи збору даних від датчиків через API або спеціальний інтерфейс.
- Вхідні дані в режимі реального часу обробляються моделлю:
- `predictions = model.predict(live_data)`

4.2. Ідентифікація проблем

- На основі прогнозу модель повідомляє тип несправності або попереджає про можливе зношення.

5. Покращення моделі

TensorFlow дозволяє регулярно оновлювати модель:

- Навчання на нових даних:

- Додати нові приклади несправностей для підвищення точності.
- Перенавчання моделі:
 - Використовувати інкрементальне навчання для адаптації до змін у даних.
- 6. Переваги використання TensorFlow для діагностики
- Гнучкість: Підтримка різних типів даних (сигнали, зображення, текст).
- Масштабованість: Можливість роботи з великими обсягами даних.
- Реальний час: Використання TensorFlow Lite для вбудованих систем (мобільні пристрої або автомобільні комп'ютери).
- Прогнозування несправностей: Застосування складних моделей прогнозування на основі історичних даних.

Результати дослідження. У роботі запропоновано структуру системи комплексної діагностики двигуна, яка включає:

- бортову систему збору даних;
- телекомунікаційні засоби передачі інформації;
- сервер обробки даних;
- модулі аналізу на основі штучного інтелекту.

Система використовує дані датчиків для формування діагностичних параметрів та визначення технічного стану двигуна.

Розроблено логічну модель бази даних, яка включає сім основних сутностей: Status, Users, Auto, Diagnostic, Owner, Details, Detector.

Між сутностями реалізовані зв'язки типу один-до-багатьох, що забезпечує зберігання інформації про результати діагностики, параметри двигуна та історію експлуатації автомобіля.

Для реалізації алгоритмів машинного навчання запропоновано використання платформи TensorFlow, яка забезпечує побудову моделей класифікації, регресії та аналізу аномалій.

Обговорення. Запропонований підхід дозволяє реалізувати інтелектуальну систему діагностики автомобільних двигунів, яка забезпечує:

- автоматичний аналіз параметрів роботи двигуна;
- раннє виявлення несправностей;
- прогнозування ресурсу елементів;
- інтеграцію з телекомунікаційними та хмарними системами.

Порівняно з традиційними методами діагностики використання алгоритмів машинного навчання дозволяє підвищити точність визначення технічного стану двигуна та скоротити час прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

Висновки.

1. Проведено аналіз сучасних методів діагностики автомобільних двигунів та визначено перспективність застосування технологій штучного інтелекту для обробки діагностичних даних.
2. Запропоновано структуру інформаційної системи діагностики двигунів на стисненому повітрі, що включає модулі збору, зберігання та обробки даних.
3. Розроблено логічну модель реляційної бази даних для зберігання інформації про параметри роботи двигуна та результати діагностики.
4. Показано можливість використання платформи TensorFlow для створення моделей машинного навчання, що дозволяють виконувати класифікацію несправностей, аналіз аномалій та прогнозування технічного стану двигуна.
5. Запропонований підхід може бути використаний для створення інтелектуальних систем моніторингу та діагностики транспортних засобів.

Список використаних джерел:

1. Романов, С. Методи аналізу даних у діагностиці автомобільних систем: дис. ... канд. техн. наук / С. Романов. - Львів: ЛПІ, 2020. - 200 с.
2. Лисенко, О. Інформаційні технології в діагностиці транспортних засобів: дис. ... канд. техн. наук / О. Лисенко. - Харків: ХНУ, 2018. - 210 с.
3. Гнатенко, В. Моделі прогнозування технічного стану автомобілів / В. Гнатенко // Автомобільна промисловість та технології. - 2021. - № 7. - С. 34-41.

4. Технології штучного інтелекту у транспорті: тези конференції AITransport 2023. - Дніпро: ДНУ, 2023. - 190 с.
5. Самойленко, І. Застосування нейронних мереж у діагностиці автомобілів / І. Самойленко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. - 2021. - № 4. - С. 145-151.
6. Войцехівський, М. Основи інформаційних технологій / М. Войцехівський. - Київ: КНУ, 2018. - 432 с.
7. Гринчук, В. Проектування інформаційних систем / В. Гринчук. - Одеса: ОНУ, 2020.
8. DzhelekarSKI P., Alexiev D. Initializing Communication to Vehicle OBDII System. Proc. Intern. Conf. ELECTRONICS, 2005, vol. 3, pp. 46–52.
9. Malekian R., Moloisane N.R., Nair L., Maharaj B.T., ChudeOkonkwo U.A.K. Design and Implementation of a Wireless OBD II Fleet Management System. IEEE Sensors J., 2017, vol. 17, no. 4, pp. 1154–1164.
10. Zhang H., Kang W. Design of the Data Acquisition System Based on STM32. Procedia Comp. Sc., 2013, vol. 17, pp. 222–228.
11. Si H., Aung Z.M. Position Data Acquisition from NMEA Protocol of Global Positioning System. IJCEE, 2011, vol. 3, no. 3, pp. 353–357.
12. Łukasz Muślewski, Roman Zinko, Oleg Polishchuk Principles of Formation of a Vehicle's Remote Diagnostics. 18th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles. MATEC Web of Conferences. Bydgoszcz, Poland, December 12, 2019. Vol. 302 (2019) P.1-9. <https://doi.org/10.1051/mateconf /201930201019>
13. Bayly M., Regan S., Plosking M. Intelligent Transport system and Motorcycle safetytext. // Monash University Accident Research Center Report Documentation Page. – 2006, July / N 260. – P.78
14. Giri N. K. Automobile Mechanics Text. / N. K. Giri // 7th ed Delhi, Khanna Publishers, 2001. – 728 p.

Дата надходження статті до видання: 20.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

В.В. Дацюк¹[0009-0008-7505-9660], А.П. Павлюк²[0000-0003-3958-0519]Луцький національний технічний університет¹
Національний університет водного господарства та природокористування²**ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ НА ДЕФОРМІВНІСТЬ
ЗГІНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Наведено результати експериментальних випробувань балок з цільної деревини за різного температурно-вологісного режиму, які були виготовлені з кроквяних систем після їх тривалої експлуатації. Загалом випробувано дванадцять балок із вологістю 12% та 15% та терміном експлуатації 25, 50 та 75 років. Встановлено вплив температурно-вологісного режиму на величини відносних деформацій балок. При збільшенні вологості балок з 12% до 15% спостерігалось незначне збільшення максимальних відносних деформацій стиснутої та розтягнутої зон. Значних закономірностей впливу віку деревини на розвиток деформацій балок не виявлено.

Ключові слова: Деревина, напружено-деформований стан, деформації, навантаження, згинальний елемент, температурно-вологісний режим, термін експлуатації.

V.V. Datsiuk, A.P. Pavluk

**INFLUENCE OF TEMPERATURE-HUMIDITY REGIME ON THE DEFORMABILITY OF
BENDING ELEMENTS AFTER LONG-TERM OPERATION**

Operational experience with timber structures shows that one of the most common defects causing negative consequences for timber as a building material is moisture exposure. There are many causes of failure in timber structures of buildings and сооружений. In most cases, failure results from a combination of specific factors and influences acting on structural elements. An analysis of the conducted studies indicates that such factors include, among others, an increase in timber moisture content and the aging of materials.

The results of experimental tests of solid timber beams under different service conditions are presented. Within the framework of the tests, these conditions were simulated by varying the moisture content of the specimens from 12% to 15% and by considering different service lives. In total, twelve experimental beams with service lives of 25, 50, and 75 years were tested. The test specimens were divided into three series with different moisture contents and service lives.

As a result of the conducted tests, the values of the relative deformations of the beams were determined from the beginning of loading until failure. The load-bearing capacity of the beams was established. The failure mode of the beams was identified, occurring in the pure bending zone. The maximum values of relative deformations in the compressed and tension zones were determined. It was established that an increase in timber moisture content leads to an increase in the relative deformations of the compressed zone of the beam by up to 12%, and of the tension zone by up to 7%. No consistent patterns regarding the influence of timber age on the development of deformations in the tested beams were identified. However, it should be noted that no clear generalized correlation can be established regarding the influence of service life on deformability. The deformation behavior and load-bearing capacity of beams depend on their service conditions and the presence of external adverse effects on timber as a building material.

Key words: Wood, stress-strain state, deformations, loading, bending element, temperature-humidity regime, service life.

Постановка проблеми. Досвід експлуатації кроквяних систем показує, що одним із найбільш поширених впливів, які спричиняють негативні наслідки для деревини як будівельного матеріалу є вплив температурно-вологісного режиму. Він може залежати від багатьох факторів. Під час експлуатації зволоження деревини може виникати внаслідок протікання інженерних мереж, пошкодження гідроізоляційних шарів та безпосередньо покрівель, утворення конденсату, зміни пори року тощо [1]. Тому питання дослідження згинальних елементів із впливом зміни температурно-вологісного режиму є актуальним питанням сьогодення.

Аналіз останніх досліджень. Існує велика кількість причин руйнування дерев'яних конструкцій будівель і споруд. Здебільшого до руйнування призводять поєднання певних факторів і чинників впливу на конструктивні елементи. Автори [2] серед таких виділяють перевантаження через снігові навантаження, помилки під час проектування, помилки під час виконання монтажу, невідповідність конструкцій. До окремої групи чинників відносяться недостатня якість матеріалів, проникнення вологи, кліматичні впливи та неналежне технічне обслуговування [2-4].

Окрім факторів явного негативного впливу на дерев'яні конструкції, існують і інші, які проявляються в більшому розрізі часу і візуально спостерігаються лише їх наслідки. До таких факторів відносять вологість деревини, яка піддається змінам в процесі її експлуатації [5-9]. Більше того, вона залежить від температурно-вологісного режиму середовища, в якому експлуатується, так як деревина може «поглинати» і «віддавати» відносну вологість. У випадках використання в якості

будівельного матеріалу деревини із підвищеною вологістю (більше 12%) і її експлуатації в теплих приміщеннях буде виникати зміна вологості балки, і, як наслідок, утворення тріщин від усушки деревини. У дерев'яних клеєних конструкціях за рахунок неоднорідності вологості шарів деревини можуть виникати додаткові внутрішні напруження, які не враховуються розрахунковими моделями [10,11].

У роботах [12-14] серед детального аналізу руйнувань дерев'яних конструкцій на різних об'єктах автори виділяють вплив вологи як одну із причин виникнення пошкоджень. У багатьох об'єктах досліджень додатковим негативним чинником впливу на технічний стан були усадкові деформації деревини, яка була зведена з надто високою вологістю порівняно з рівноважною вологістю будівлі в цілому.

Постановка завдання. Метою роботи є встановлення деформацій балок з цільної деревини за різної вологості та термінів експлуатації від початку завантаження і до руйнування.

Методика експериментальних досліджень. В рамках виконання поставленої мети роботи було проведено дослідження балок із цільної деревини. Деревина для виготовлення балок використовувалась із об'єктів (кроквяних систем), що перебували в експлуатації протягом приблизно 25, 50 та 75 років зі зміною температурно-вологісного режиму.

Крім терміну експлуатації ще одним параметром, який досліджувався як фактор впливу на деформації балок, була вологість. Вологість балок, які піддавались випробуванню, становила 12 та 15% відповідно. Різний вік та вологість дослідних балок моделювали різні режими експлуатації.

Випробування проводилось в сертифікованій лабораторії. Методика випробувань згинальних елементів цільного перерізу наведена в науковій праці [15]. Випробуванню піддавались балки з поперечним перерізом 50x80(h) мм і довжиною 1650 мм. Розрахунковий проліт становив 1500 мм. Навантаження прикладалось в трети прольоту, що забезпечувало роботу балки в зоні чистого згину.

Перед випробуваннями всі балки були умовно поділені на шість серій – по дві балки в кожній серії. Вимірювання відносних деформацій балок виконувалось з використанням тензодатчиків та тензометричної системи. Загальна кількість датчиків на кожній балці становила 8 шт. Встановлення датчиків проводилось в середині прольоту балки, так як в даному місці деформації будуть максимальні.

Всі експерименти проводились згідно діючих нормативних документів [16-19].

Результати експериментальних досліджень. Після обробки отриманих результатів отримали графіки деформування балок від початку завантаження і до руйнування. На рис. 1...6 наведені графіки деформування балок Б-1, Б-3, Б-5, Б-7, Б-9 та Б-11 (по одній на кожній із серій балок) та схема розташування тензодатчиків по відношенню до поперечного перерізу балки.

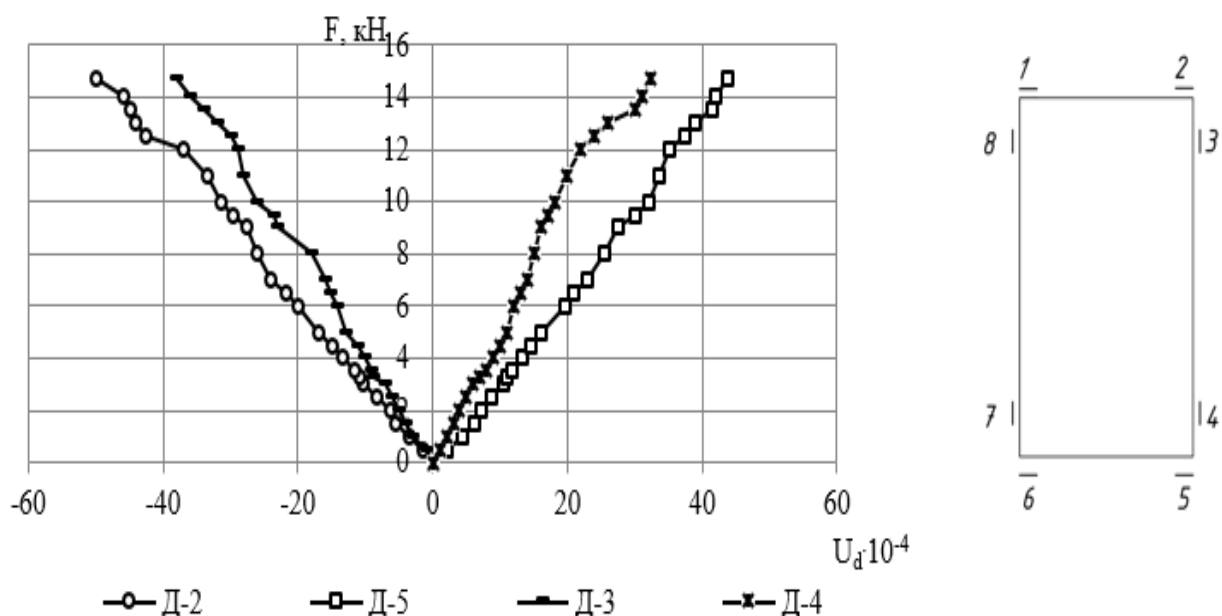


Рис.1. Деформування балки Б-1

© В.В. Дацюк, А.П. Павлюк

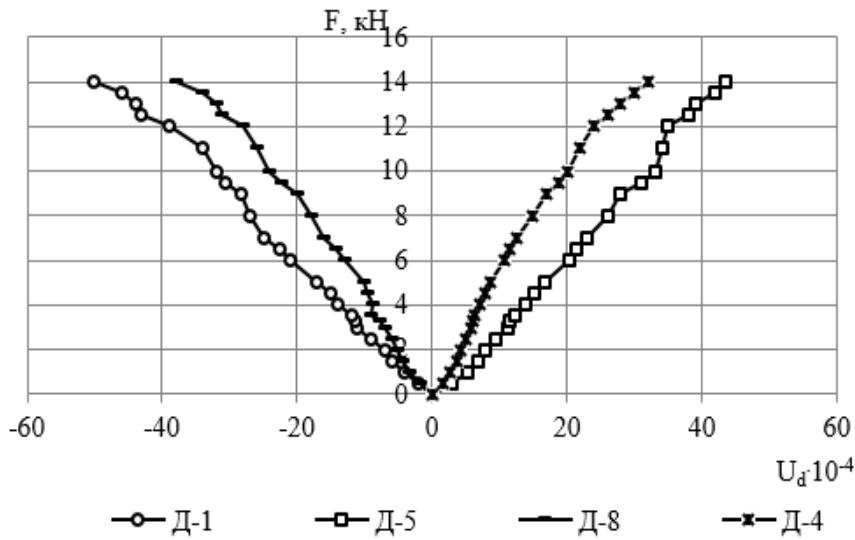


Рис.2. Деформування балки Б-3

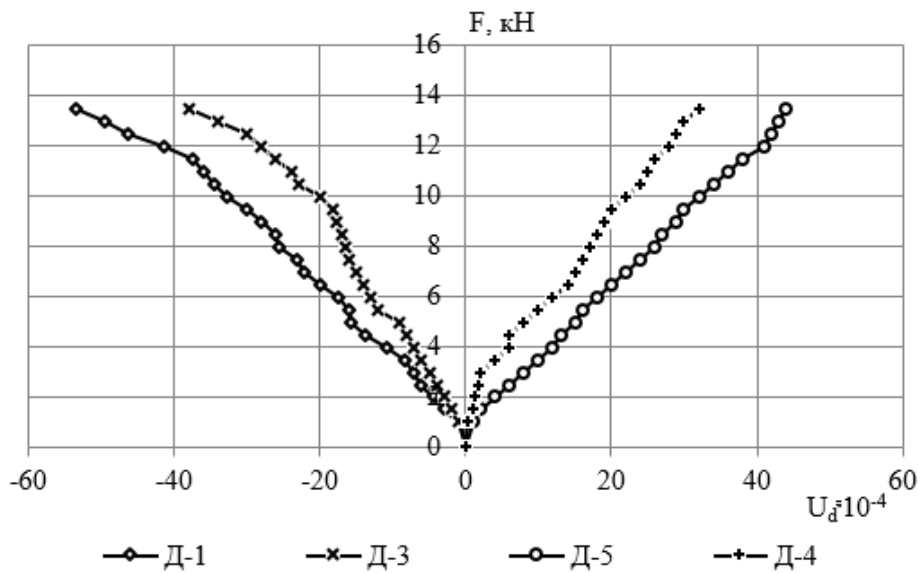


Рис.3. Деформування балки Б-5

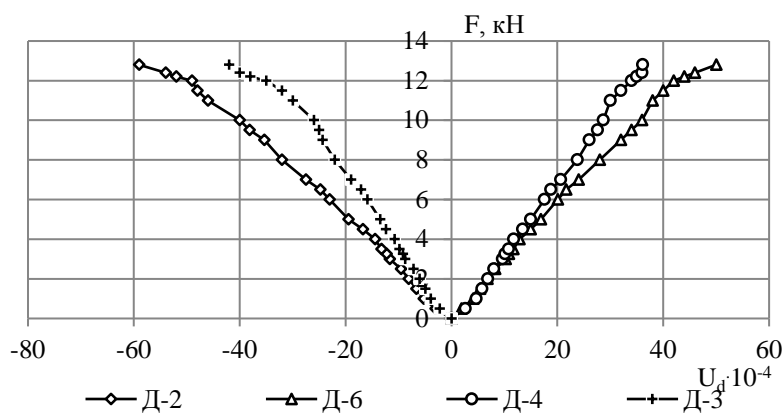


Рис.4. Деформування балки Б-7

© В.В. Дацюк, А.П. Павлюк

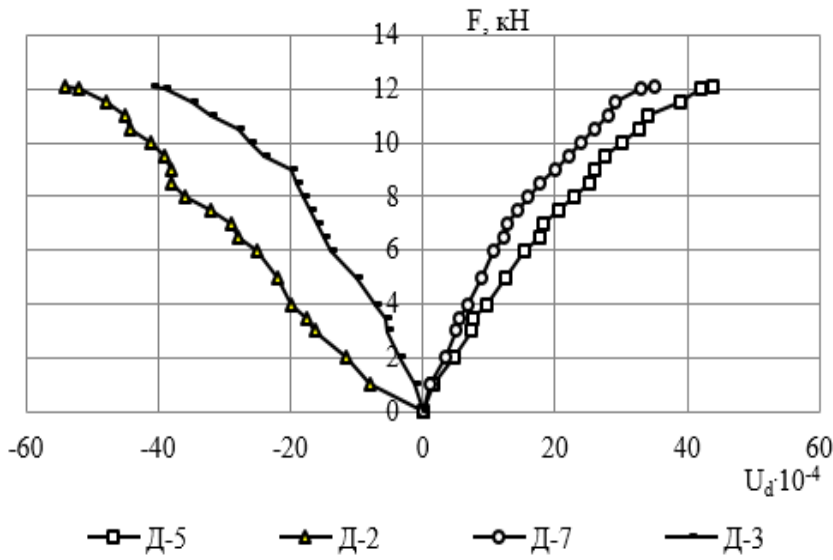


Рис.5. Деформування балки Б-9

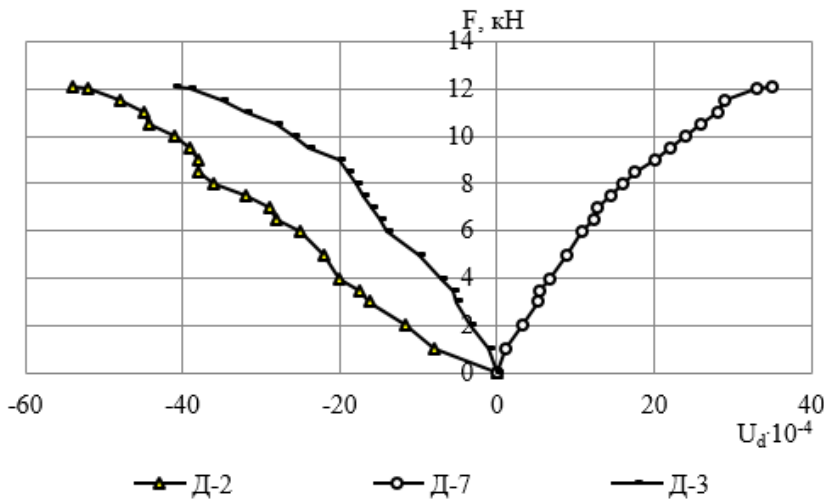


Рис.5. Деформування балки Б-9

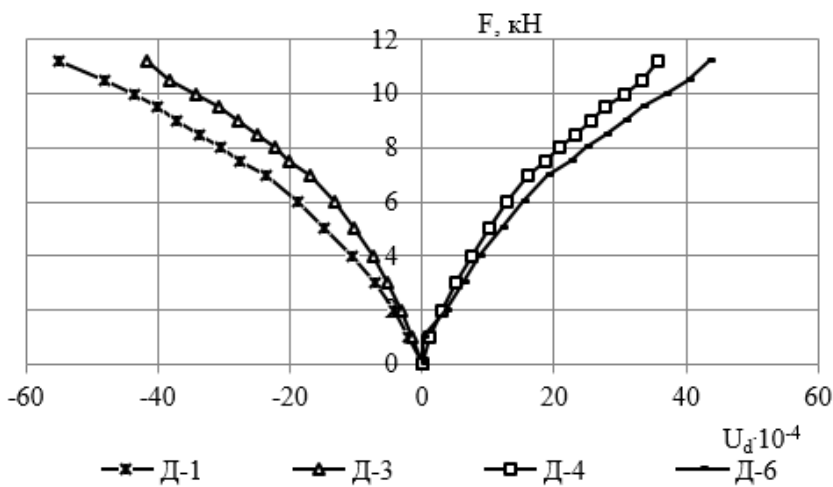


Рис.6. Деформування балки Б-11



В таблиці 1 наведені отримані результати максимальних відносних деформацій стиснутої та розтягнутої зони для кожної із балок, що випробовувались.

Табл. 1

Максимальні відносні деформації балок

Назва балки	Вологість балки	Термін експлуатації деревини, з якої виготовлялись балки, років	Серія	Максимальні деформації стисненої зони, $U_{c,d} \times 10^{-4}$	Максимальні деформації розтягнутої зони, $U_{t,d} \times 10^{-4}$
Б-1	12	25	1	49,9	43,8
Б-2	12	25		50,3	44,8
Б-3	12	50	2	50,2	43,4
Б-4	12	50		49,5	42,1
Б-5	12	75	3	53,3	44,2
Б-6	12	75		49,5	44,1
Б-7	15	25	4	58,9	49,3
Б-8	15	25		57,1	46,4
Б-9	15	50	5	56,4	44,2
Б-10	15	50		56,1	49,2
Б-11	15	75	6	55,1	42,9
Б-12	15	75		56,2	48,4

В таблиці 2 наведені максимальні середні значення деформацій стиснутої та розтягнутої зон для кожної із серій балок. Середні значення для кожної із серій знаходились як середнє арифметичне між максимальними значеннями деформацій двох балок.

Табл. 2

Максимальні деформації стиснутої та розтягнутої зон балок

Номер серії	Руйнівне навантаження, кН	Середні максимальні деформації стисненої зони, $U_{c,d} \times 10^{-4}$	Середні максимальні деформації розтягнутої зони, $U_{t,d} \times 10^{-4}$
1 серія	14,7	50,10	44,30
2 серія	14,0	49,85	42,75
3 серія	13,5	51,40	44,15
4 серія	12,8	58,00	47,85
5 серія	12,1	56,25	46,70
6 серія	11,2	55,65	45,65

Максимальні відносні деформації стиснутої зони для балок першої, другої та третьої серії знаходились в межах від $u_{c,d} = 49,85 \times 10^{-4}$ до $u_{c,d} = 51,40 \times 10^{-4}$, розтягнутої зони – від $u_{t,d} = 42,75 \times 10^{-4}$ до $u_{t,d} = 44,30 \times 10^{-4}$. Максимальні відносні деформації стиснутої зони для балок четвертої, п'ятої та шостої серії знаходились в межах від $u_{c,d} = 55,65 \times 10^{-4}$ до $u_{c,d} = 58,00 \times 10^{-4}$, розтягнутої зони – від $u_{t,d} = 45,65 \times 10^{-4}$ до $u_{t,d} = 47,85 \times 10^{-4}$.

Висновки.

1. В результаті проведення випробувань встановлено вплив температурно-вологісного режиму на величини відносних деформацій дерев'яних балок цільного перерізу після тривалої експлуатації.
2. Встановлено, що збільшення вологості деревини з 12 до 15 % призводить до незначного збільшення максимальних відносних деформацій стиснутої та розтягнутої зон.
3. Значних закономірностей між розподілом максимальних відносних деформацій та терміном експлуатації деревини в рамках випробувань фактично не виявлено.

Список використаних джерел

1. Дацюк В.В., Гомон Св.Св., Петренко О.В. Тривала експлуатація елементів та конструкцій з деревини. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк: ЛНТУ, 2023. Вип. 20. С. 11-18. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10\(20\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10(20)-02)
2. Blaß H. J., Frese M., 2010. Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz. 134 p.
3. Frese M., Blas H.J., 2011. Statistics of damages to timber structures in Germany. *Engineering Structures* 33 (11), 2969-2977. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.030>
4. Eva Frühwald Hansson, 2011. Analysis of structural failures in timber structures: Typical causes for failure and failure modes. *Engineering Structures* 33 (11), 2978–2982. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.045>
5. Roshchuk M., Homon S., Pavluk A., Gomon S., Drobyshtynets S., Romaniuk M., Smal M., Dziubynska O., 2024. Effect of long-term moisture on the mechanical properties of wood: an experimental study. *Procedia Structural Integrity* 59, 718-723. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.102>
6. Гомон Св.Св., Гомон С.С., Рощук М.М. Експериментально-теоретичні дослідження критичних деформацій деревини хвойних порід з підвищеним вмістом вологи. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2023. Вип. 44. С. 157-164. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i44.18>
7. Ясній П.В., Гомон С.С. Експериментальні дослідження суцільної деревини конструкційних розмірів з врахуванням фактора вологості. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: ВНТУ, 2020. Том 28. №1. С. 41–48. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-1-49-56>
8. Рощук М.М., Гомон Св.Св. Несуча здатність дерев'яних балок цільного перерізу після тривалого зволоження. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди*. Рівне, 2025. Вип. 48. С. 262-268. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i48.29>
9. Datsiuk V., Homon S., Gomon S., Dovbenko V., Petrenko O., Parfentyeva I., Romaniuk M., 2024. Effect of long-term operation on the strength properties of pine wood. *Procedia Structural Integrity* 59, 583-587. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.082>
10. Kánnár A., 2012. Szakmai zárójelentés A Baross Rtartó1 Omfb-00398/2010 számú pályázat hoz, 22.
11. Csilla V., 2012. Damage problems in glued laminated timber. *Drewno* 55 (188), 115-128.
12. Dröge, G., Dröge, T. Schäden an Holztragwerken. *Schadenfreies Bauen*, Band 28, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2003.
13. Mönck, W., Erler, K. Schäden an Holzkonstruktionen. Huss-Medien GmbH, Verlag Bauwesen, 4th Ed., Berlin 2004.
14. Colling F. Lernen aus Schäden in Holzbau - Ursachen, Vermeidung, Beispiele. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2000.

15. Datsiuk V., Homon S., Lukianenko O., Gomon S., Puhach Yu., Gomon P., Kis N., Kutsyna I., 2026. Structural performance of timber beams after long-term service: an experimental study. *Procedia Structural Integrity* 81, 73-77. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2026.03.013>
16. ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. К.: Мінрегіон України, 2018. 36 с.
17. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. К.: Мінрегіон України, 2017. 111 с.
18. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. – К.: ДП “УкрНДНЦ”, 2024.-74 с.
19. Eurocode 5. (2004). Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings. 124 p.

Дата надходження статті до видання: 20.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

Л.М. Самчук^[0000-0003-2516-045X], В.М. Франчук, В.А Єрьомін

Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

У статті проаналізовано сучасні та перспективні матеріали для виготовлення електромобілів із урахуванням їхніх фізико-механічних, економічних і екологічних характеристик. Запропоновано використання коефіцієнта матеріальної переваги $K = (\sigma - \rho) / C$ для кількісного порівняння ефективності сталей, сплавів і композитів. Встановлено, що найбільш збалансовані показники мають сталі нового покоління (AHSS), алюмінієві сплави серії 6xxx і полімерні композити. До 2030 року очікується зменшення частки сталі до 25 % і зростання ролі алюмінію та композитів до 28–30 %. Отримані результати відповідають концепціям *lightweighting*, *additivemanufacturing* та *circulareconomy*, що визначають розвиток сучасного електромобілебудування.

Ключові слова: електромобіль, конструкційні матеріали, легкі сплави, композити, сталі нового покоління.

L. Samchuk, V. Franchuk, V. Yeremin**ANALYSIS OF MODERN AND PROMISING MATERIALS FOR ELECTRIC CAR MANUFACTURING**

The article analyzes modern and promising materials for the manufacture of electric vehicles, taking into account their physical, mechanical, economic, and environmental characteristics. The use of the material advantage coefficient $K = (\sigma - \rho) / C$ is proposed for a quantitative comparison of the efficiency of steels, alloys, and composites. It has been established that the most balanced indicators are found in new-generation steels (AHSS), 6xxx series aluminum alloys, and polymer composites. By 2030, the share of steel is expected to decrease to 25%, while the role of aluminum and composites is expected to grow to 28–30%. The results obtained are consistent with the concepts of *light weighting*, *additive manufacturing*, and *circular economy*, which determine the development of modern electric vehicle manufacturing.

Keywords: electric vehicles, structural materials, light alloys, composites, new generation steels.

Постановка проблеми. Перехід до електромобільного транспорту вимагає використання нових конструкційних матеріалів, які поєднують легкість, міцність і екологічну стійкість. Традиційні сталі вже не повністю відповідають вимогам енергоефективності та зниження маси. Водночас широке впровадження алюмінієвих і магнієвих сплавів, високоміцних сталей нового покоління, полімерних та волокнистих композитів супроводжується низкою критичних проблем, зокрема високою енергоємністю виробництва, значною вартістю сировини, складністю з'єднання різнорідних матеріалів і обмеженими можливостями їх повторного використання та рециклінгу. Особливої актуальності набуває питання формування багатоматеріальних конструкцій, у яких поєднання металевих і полімерних компонентів часто призводить до технологічних, експлуатаційних і екологічних компромісів. На сьогодні недостатньо систематизованими залишаються наукові підходи до оптимізації структури та складу багатоматеріальних систем з урахуванням не лише механічних і експлуатаційних характеристик, а й повного життєвого циклу виробу — від отримання сировини та виробництва до експлуатації, ремонту та утилізації. В умовах посилення міжнародних екологічних стандартів, вимог до циркулярної економіки та відповідальності виробників постає нагальна потреба у розробленні науково обґрунтованих критеріїв вибору й комбінування матеріалів для конструкцій електромобілів, які забезпечуватимуть оптимальний баланс між механічною ефективністю, економічною доцільністю та екологічною стійкістю.

Наукова новизна роботи полягає у формалізованій аналітично-методичній адаптації підходу вибору матеріалів за Ешбі до умов сучасного серійного електромобільного виробництва, що характеризується жорсткими обмеженнями за масою, вартістю та екологічними показниками. На відміну від більшості існуючих досліджень, у яких аналіз конструкційних матеріалів для електромобілів має переважно якісний або вузькоспеціалізований характер, у даній роботі запропоновано інтегральний інженерний підхід до порівняльного ранжування матеріалів різної природи на основі узагальненого коефіцієнта матеріальної переваги, що поєднує міцнісні, масові та економічні характеристики. Новизна підходу полягає не у введенні нового фундаментального матеріалознавчого критерію, а у практичній інтерпретації та інженерному використанні безрозмірного інтегрального індексу як інструменту первинної оцінки доцільності застосування сталей нового покоління, легких металевих сплавів і полімерних композитів у конструкціях електромобілів. Такий підхід дозволяє перейти від фрагментарного порівняння окремих

властивостей матеріалів до кількісно обґрунтованого аналізу їх збалансованості в контексті масового виробництва.

Додатковим елементом наукової новизни є інтерпретація отриманих результатів у поєднанні з прогнозуванням зміни структури матеріалів у виробництві електромобілів до 2030 року, що дає змогу пояснити збереження провідної ролі сталей нового покоління попри активний розвиток легких металів і композитних систем. Запропонований підхід може бути використаний як аналітична основа для прийняття інженерних рішень на ранніх етапах проектування багатоматеріальних конструкцій електромобілів.

Метою роботи – є аналіз сучасних та перспективних матеріалів для виготовлення автомобілів, оцінка їхніх властивостей і можливостей застосування, а також визначення оптимальних рішень для підвищення надійності, безпеки, енергоефективності та екологічності сучасних транспортних засобів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У статті [1] систематизовано підходи до вибору конструкційних матеріалів у машинобудуванні з урахуванням критеріїв міцності, густини, технологічності та вартості. Автор запропонував універсальні методики оцінювання ефективності матеріалів, які стали основою для порівняльного аналізу сталей, легких сплавів та композитів у даному дослідженні.

У статті [2] розглянуто актуальні тенденції у використанні легких матеріалів для електромобілів та їхній вплив на енергоефективність транспортних систем. Автор робить акцент на сталях нового покоління, алюмінієвих і магнієвих сплавах, а також полімерних композитах, зазначаючи, що до 2035 року частка сталей у конструкціях електромобілів зменшиться майже вдвічі. Особливу увагу приділено проблемі балансу між механічними характеристиками та екологічними матеріалами.

Дослідження [3] присвячене розробленню принципів сталого матеріалознавства для електромобільного транспорту. У роботі запропоновано методологію «Sustainable Material Index» — інтегрального показника, який поєднує механічну ефективність і вуглецеву інтенсивність виробництва. Автори доводять, що полімерні композити нового покоління, особливо із частковим біовмісним компонентом, можуть зменшити викиди CO₂ на 40 % у порівнянні з традиційною сталлю.

У праці [4] здійснено порівняльний аналіз алюмінієвих і композитних конструкцій у контексті проектування електромобілів. Дослідження показує, що використання алюмінієвих сплавів серії бxxx дозволяє зменшити масу кузова до 40 %, тоді як композити забезпечують ще більший потенціал у легких несучих елементах. Автори наголошують, що висока собівартість наразі стримує їхнє широке промислове застосування.

Стаття [5] узагальнює світовий досвід впровадження принципів циркулярної економіки в автомобілебудуванні. Автори підкреслюють, що вторинна переробка алюмінію та сталі досягає 95–98 %, тоді як композити залишаються складними у рециклінгу. У роботі описано сучасні технології піролізу, хімічного відновлення волокон і виробництва біокомпозитів на основі лляних і конопляних волокон.

У дослідженні [6] проведено екологічний та економічний аналіз традиційних методів зварювання. Автори визначили, що автоматизовані варіанти зварювання зменшують енергоспоживання до 25 % і викиди CO₂ на 15–18 % порівняно з ручними процесами, що робить їх перспективними для виробництва корпусів і рам електромобілів.

Авторами роботи [7] розглянуто сучасні шляхи підвищення ефективності процесів TIG-зварювання (використання інертного захисного газу) шляхом оптимізації полярності, геометрії шва та теплового режиму. Отримані результати свідчать про можливість інтеграції TIG-зварювання у виробництво легких алюмінієвих і магнієвих сплавів без втрати якості з'єднань.

Стаття [8] описує технологічні переваги гібридного лазерно-плазмового зварювання, яке поєднує високу точність лазерної обробки з глибиною проплавлення плазмового процесу. Автори зазначають, що цей метод дає змогу ефективно поєднувати різні матеріали — наприклад, алюміній і сталь, що є важливим для створення багатоматеріальних кузовів електромобілів.

У роботі [9] досліджено вплив промислових факторів на якість контактного точкового зварювання. Робота має практичне значення для оцінки експлуатаційної надійності електричних з'єднань у легких металевих конструкціях.

Стаття [10] присвячена розробленню автоматизованого технологічного процесу зварювання металевих виробів у контексті Індустрії 4.0. Запропоновано комп'ютерно-інтегровану систему

контролю параметрів зварювання, яка може бути адаптована до виробництва алюмінієвих та композитних компонентів електромобілів.

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених вибору матеріалів для електромобілів, більшість робіт зосереджені або на аналізі окремих груп матеріалів, або на якісному описі тенденцій без формалізованої кількісної оцінки їх ефективності. У наявних публікаціях недостатньо уваги приділено поєднанню механічних характеристик матеріалів з економічними показниками та екологічними обмеженнями в межах єдиного аналітичного підходу. У даній роботі запропоновано інтегральний підхід до порівняльної оцінки конструкційних матеріалів електромобілів, який базується на використанні коефіцієнта матеріальної переваги, адаптованого до умов електромобільного виробництва. На відміну від існуючих досліджень, у роботі виконано узагальнений кількісний аналіз сталей нового покоління, легких металевих сплавів та полімерних композитів із урахуванням вартості матеріалу та прогнозованих змін структури матеріального складу електромобілів до 2030 року.

Викладення основного матеріалу. Автомобільна промисловість сьогодні переживає масштабну трансформацію, спричинену переходом до електромобільного транспорту, глобальними вимогами енергоефективності, декарбонізації та екологічної відповідальності. У центрі цієї трансформації перебуває матеріалознавча основа конструкцій електромобілів, адже саме вибір матеріалів визначає масу, безпеку, довговічність, собівартість і навіть стратегічну придатність технологій до циркулярної економіки. Кожен кілограм зменшення маси транспортного засобу впливає на запас ходу, споживання енергії та кількість шкідливих викидів, тому оптимізація конструкцій через використання легких, міцних і стійких матеріалів стала одним із ключових напрямів розвитку автомобілебудування. Сучасні тенденції матеріалознавства орієнтовані на пошук оптимального балансу між густиною, питомою міцністю, технологічністю та екологічною стійкістю. Якщо традиційна автомобільна сталь десятиліттями залишалася основним конструкційним матеріалом, то сьогодні відбувається перехід до багатоматеріальних платформ, у яких сталі нового покоління поєднуються з алюмінієвими, магнієвими, титановими й композитними елементами. Такий підхід забезпечує зниження маси кузова електромобіля на 30–50 % без втрати жорсткості та безпеки, а також сприяє підвищенню енергоефективності на 10–15 %.

Дослідження має аналітично-методичний характер і ґрунтується на поєднанні порівняльного аналізу властивостей матеріалів, елементів методології відбору матеріалів за Ешбі та прогнозування розвитку електромобільної галузі. Методика дослідження включає: формування репрезентативних груп матеріалів, що застосовуються або розглядаються для використання в електромобілях; узагальнення фізико-механічних, економічних та екологічних параметрів на основі сучасних літературних джерел; кількісну оцінку ефективності матеріалів із використанням інтегрального коефіцієнта матеріальної переваги; аналітичне порівняння отриманих результатів та їх інтерпретацію з позицій масового і перспективного електромобільного виробництва.

Метою такого аналізу є комплексна оцінка ефективності конструкційних матеріалів для електромобілів із урахуванням фізико-механічних, економічних і екологічних аспектів, а також визначення їх перспектив розвитку до 2030 року. Дослідження має аналітично-оглядовий характер і базується на узагальненні даних провідних наукових баз Scopus, ScienceDirect та SpringerLink за 2020–2025 роки. Для аналізу обрано п'ять типових груп матеріалів: сталі нового покоління (AHSS), алюмінієві та магнієві сплави, титан і полімерні композити. Основними критеріями оцінки виступають густина, міцність на розтяг, модуль пружності, собівартість і обсяг викидів CO₂ під час виробництва. Для кількісної оцінки ефективності використано коефіцієнт матеріальної переваги (K), який інтегрує три основні параметри — міцність, густину та вартість матеріалу. Його застосування ґрунтується на підході Ешбі, рекомендованому для порівняння конструкційних матеріалів різної природи. Формула має вигляд:

$$K = (\sigma - \rho) / C \quad (1)$$

де: σ – нормалізована міцність матеріалу; ρ – нормалізована густина; C – нормалізована вартість матеріалу.

Базові значення для нормалізації:

$$\sigma_n = 1000 \text{ МПа};$$

$$\rho_n = 7,8 \text{ г/см}^3;$$

$$C_n = 1 \text{ €/кг};$$

1. Сталь AHSS;

$$\sigma_n = 1000 / 1000 = 1,00;$$

$$\rho_n = 7,8 / 7,8 = 1,00;$$

$$C_n = 1,0 / 1,0 = 1,00;$$

$$K_{AHSS} = (1,00 - 1,00) / 1,00 \approx 0,128.$$

2. Алюмінієвий сплав бxxx

$$\sigma_n = 350 / 1000 = 0,35;$$

$$\rho_n = 2,7 / 7,8 \approx 0,35;$$

$$C_n = 2,8 / 1,0 = 2,8;$$

$$K_{Al} = (0,35 - 0,35) / 2,8 \approx 0,046.$$

Отримані значення коефіцієнта матеріальної переваги свідчать, що сталі нового покоління мають найвищий інтегральний показник ефективності серед розглянутих матеріалів. Незважаючи на більшу густину, AHSS компенсують масові недоліки високою міцністю та низькою вартістю. Алюмінієві сплави, попри значно меншу густину, демонструють нижче значення коефіцієнта K через обмежену міцність і вищу собівартість. Такий приклад розрахунку підтверджує доцільність використання коефіцієнта K як інженерного інструменту первинного ранжування матеріалів для електромобілебудування та пояснює збереження провідної ролі сталей AHSS у масовому виробництві електромобілів.

Запропонований у роботі підхід відрізняється від класичних карт матеріального вибору Ешбі тим, що орієнтований не на оптимізацію окремої механічної властивості, а на інтегральну оцінку матеріалів у контексті серійного електромобільного виробництва. На відміну від традиційних діаграм «міцність – густина» або «жорсткість – маса», у даному дослідженні враховано економічний фактор, який суттєво обмежує практичне впровадження високоефективних, але дорогих матеріалів. Таким чином, підхід, використаний у роботі, дозволяє перейти від абстрактного матеріалознавчого порівняння до інженерно обґрунтованого вибору матеріалів для реальних конструкцій електромобілів.

Коефіцієнт матеріальної переваги $K = (\sigma - \rho) / C$ використовують саме тому, що він дає можливість поєднати три ключові параметри — міцність, густину та вартість — в один інтегральний показник, придатний для порівняння матеріалів різної природи. Такий підхід відповідає ідеї Ешбі: максимізувати експлуатаційну здатність при мінімізації маси й витрат. На відміну від питомої міцності чи відносної жорсткості, які враховують лише співвідношення механічних характеристик, коефіцієнт K дозволяє одночасно оцінити і технічні, і економічні аспекти, тому є більш придатним для швидкого ранжування матеріалів у практичних інженерних задачах. Наприклад, матеріал може мати високу питому міцність, але бути настільки дорогим, що його застосування стає нерациональним — коефіцієнт K одразу це відображає.

Попри універсальність, модель має суттєві обмеження. Формула є спрощенням і не враховує поведінку матеріалу в реальних умовах роботи, зокрема корозійну стійкість, повзучість, чутливість до ударних навантажень чи температурних змін. Модуль пружності у формулі відсутній, тому для конструкцій, де жорсткість є визначальною, критерій K може дати не чітку оцінку. Крім того, значення σ і ρ для композитів залежать від орієнтації волокон, що не відображається в моделі. Показник K також не враховує екологічних параметрів, таких як енергомісткість виробництва, вибір технології, зварюваність, придатність до переробки чи викиди CO_2 , тому сам по собі не може бути критерієм стійкого матеріального вибору. Він також не відображає реальної собівартості конструкції, оскільки ціна за кілограм не враховує труднощі обробки чи контроль якості. Тому коефіцієнт K доцільно використовувати як первинний орієнтовний індикатор, який надалі доповнюється екологічним та технологічним аналізом, а також розглядом експлуатаційних властивостей матеріалу. В таблиці 1 наведено порівняння основних матеріалів для електромобілів.

Сталі нового покоління (AHSS) залишаються найбільш ефективним матеріалом для масового виробництва електромобілів завдяки поєднанню високої міцності, технологічної сумісності з існуючими процесами зварювання, доступної вартості. Вони використовуються для виготовлення силових елементів кузова, дверних рам, енергопоглинаючих зон і підсилювачів безпеки. У моделей Volkswagen ID.4 та Ford Mustang Mach-E частка AHSS перевищує 45 % каркаса кузова, що забезпечує високу пасивну безпеку при зниженні маси до 15 % порівняно з традиційними сталями. Крім того, сталі цієї категорії мають один із найнижчих показників викидів CO_2 серед усіх металів (близько 2 кг/кг продукції), що робить їх найбільш екологічно раціональними для серійного виробництва.

Алюмінієві сплави серії бxxx демонструють оптимальний баланс між питомою жорсткістю, легкою вагою та технологічністю лиття. Вони забезпечують зниження маси кузова до 40 % і активно використовуються у технології Giga Casting, впровадженій компаніями Tesla, Volvo для

виготовлення великих несучих елементів кузова, підрамників та інтегрованих секцій батарейних платформ. Алюміній характеризується високим рівнем переробності (до 98 %) і стабільністю властивостей при вторинному плавленні, що відповідає принципам економіки. Його застосування дозволяє не лише підвищити енергоефективність, але й скоротити загальний життєвий вуглецевий слід автомобіля. Магнієві сплави, зокрема AZ91, відзначаються найнижчою густиною серед конструкційних металів, що дає можливість зменшити масу окремих вузлів на 60–70 %. Їх активно використовують у виробництві легких корпусів електронних модулів, кронштейнів, елементів рульового управління та опор двигунів, як це реалізовано в BMW та Nissan Leaf. Основною перевагою магнієвих сплавів є висока питома жорсткість, однак недоліками залишаються підвищена схильність до корозії та складність у зварюванні. Для усунення цих обмежень застосовуються полімерно-керамічні покриття та комбіновані технології термічного напилення, які подовжують термін служби деталей у 1,5–2 рази.

Титанові сплави, зокрема Ti-6Al-4V, демонструють високу міцність і корозійну стійкість, що робить їх незамінними у вузлах із підвищеними навантаженнями — елементах підвіски, болтах акумуляторних модулів, кріпленнях силових компонентів. Їх застосування характерне для високотехнологічних моделей, де пріоритетом є довговічність і мінімальна маса при максимальній жорсткості. Однак надвисока собівартість (≈ 18 €/кг) обмежує масове впровадження титану в серійне виробництво.

Полімерні композити на основі вуглеволокна займають місце серед конструкційних матеріалів майбутнього. Вони забезпечують зниження маси кузова на 60–65 % без втрати жорсткості, мають високі вібраційні характеристики та сумісні з адитивними технологіями. У преміальних електромобілях, таких як BMW використовується для виготовлення дахових панелей, капотів, каркасів дверей. Головним викликом залишається висока вартість виробництва й обмежена переробність — сьогодні лише 15–20 % композитів підлягають вторинному використанню. Проте впровадження методів піролізу та хімічного рециклінгу поступово дозволяє зберігати механічні властивості вуглеволокна і повторно використовувати їх у нових матеріалах. Метою проведеного аналізу є не відкриття нових матеріалів, а кількісне обґрунтування доцільності їх використання в конструкціях електромобілів з позицій сучасних економічних і технологічних обмежень. Навіть для добре відомих матеріалів отримані результати дозволяють виявити закономірності, які не є очевидними при якісному аналізі, зокрема пояснити причини збереження високої частки сталей нового покоління у масовому виробництві електромобілів.

Табл. 1.

Порівняння основних матеріалів для електромобілів
(узагальнено за Yan, 2025; Ghoshetal., 2025)

Матеріал	Густина, г/см ³	Міцність, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Ціна, €/кг	Викиди CO ₂ , кг/кг	Коеф. К, ум. од.
Сталь AHSS	7,8	1000	210	1,0	2,1	0,128
Алюміній бxxx	2,7	350	70	2,8	12,0	0,046
Магній AZ91	1,8	250	45	3,5	26,0	0,040
Титан Ti-6Al-4V	4,5	950	110	18,0	40,0	0,012
Вуглепластик	1,6	600	80	20,0	30,0	0,019

Отримані результати свідчать, що ефективність матеріалів для електромобілів визначається не максимальними значеннями окремих параметрів, а їх збалансованим поєднанням. Зокрема, матеріали з мінімальною густиною не завжди демонструють найвищу конструкційну ефективність через обмеження міцності або високу собівартість. Водночас матеріали із середніми значеннями густини, але високою міцністю та доступною вартістю, забезпечують більш сприятливе співвідношення параметрів для масового виробництва. Такий результат пояснює збереження домінуючої ролі сталей нового покоління у конструкціях електромобілів, попри активний розвиток легких металів і композитів. Таким чином, перехід до багатоматеріальних платформ слід розглядати не як заміну одного матеріалу іншим, а як раціональний розподіл функцій між матеріалами відповідно до їхніх сильних сторін.

Вплив густини матеріалу на узагальнену конструкційну ефективність проілюстровано на рис. 1, де наведено залежність коефіцієнта матеріальної переваги K від густини ρ . Рис. 1 демонструє, що зменшення густини матеріалу не приводить автоматично до підвищення ефективності. Незважаючи на мінімальну густину магнієвих сплавів і полімерних композитів, їх значення

коефіцієнта K залишаються нижчими порівняно зі сталями нового покоління, що свідчить про нелінійний характер залежності $K(\rho)$ та необхідність врахування комплексу параметрів.

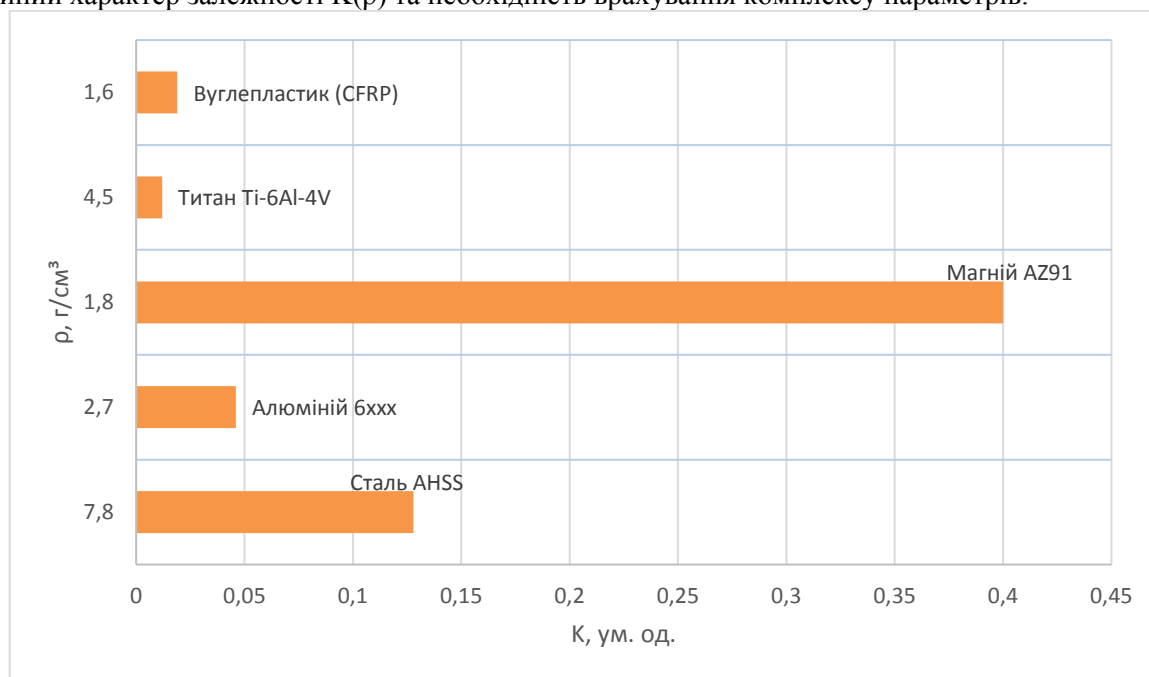


Рис. 1. Залежність K від густини (ρ)

Аналіз показує відсутність прямої лінійної залежності між густиною матеріалу та значенням коефіцієнта K . Зменшення густини матеріалу саме по собі не призводить до зростання ефективності, що особливо характерно для магнієвих сплавів і полімерних композитів. Таким чином, графік підтверджує нелінійний характер залежності $K(\rho)$ та свідчить про необхідність урахування комплексу параметрів при виборі матеріалів для електромобілів.

Не менш показовим є вплив вартості матеріалу, який відображено на рисунку 2, де наведено залежність коефіцієнта матеріальної переваги від ціни. Рисунок 2 чітко демонструє визначальну роль економічного чинника: сталі AHSS займають домінуючу позицію завдяки найнижчій вартості при високих механічних характеристиках. Алюмінієві та магнієві сплави забезпечують лише помірні значення коефіцієнта K , що обмежує їх застосування вузлами, де мінімізація маси є критичною. Значне зниження коефіцієнта K для титанових сплавів підтверджує, що, попри унікальні експлуатаційні властивості, їх використання економічно виправдане лише у спеціалізованих або преміальних сегментах.

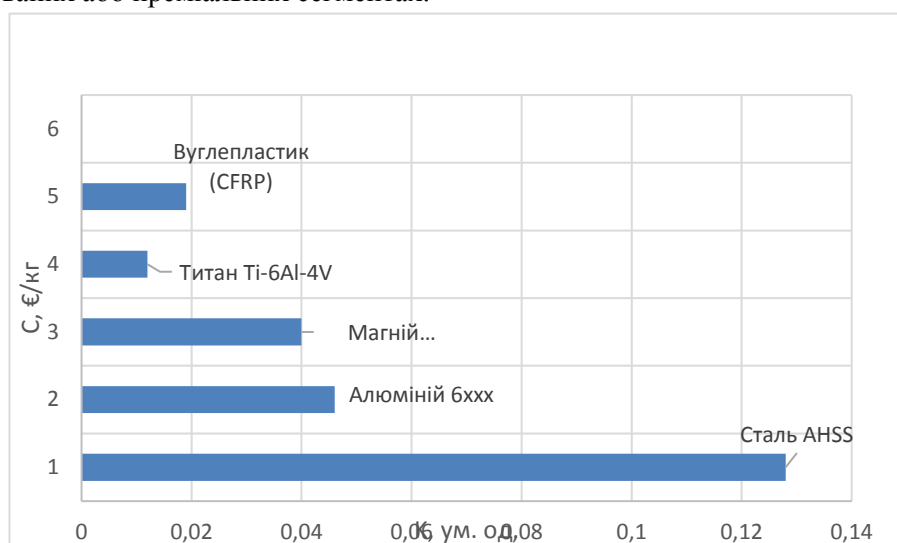


Рис. 2. Залежність K від вартості

Аналіз залежності коефіцієнта матеріальної переваги від вартості матеріалу свідчить про наявність чітко вираженої оберненої тенденції: зі зростанням ціни матеріалу значення коефіцієнта K суттєво зменшується. Залежність демонструє визначальну роль економічного чинника при

порівнянні різнорідних матеріалів. Зокрема, навіть матеріали з високими механічними характеристиками, такі як титанові сплави, характеризуються низькою ефективністю в межах запропонованого критерію через високу собівартість. Отриманий результат підтверджує доцільність використання коефіцієнта K для інженерного ранжування матеріалів у контексті масового електромобілебудування.

Побудовані графіки залежності коефіцієнта матеріальної переваги K від густини та вартості матеріалів дозволяють провести комплексне порівняння конструкційної ефективності п'яти типових груп матеріалів, що застосовуються в електромобілебудуванні. Отримані залежності демонструють наявність чітко виражених закономірностей, які визначають доцільність використання того чи іншого матеріалу в контексті масового виробництва електромобілів. По-перше, аналіз залежності K від густини показує, що низька густина сама по собі не гарантує високої конструкційної ефективності. Незважаючи на мінімальну густина, полімерні композити та магнієві сплави демонструють менший коефіцієнт K порівняно зі сталлю AHSS. Це зумовлено тим, що їхня міцність на розтяг недостатньо висока для повної компенсації в масі, а в окремих випадках додаткове обмеження накладає висока собівартість. Таким чином, залежність $K(\rho)$ має нелінійний характер: матеріали легкої групи дають переваги лише за умов високої міцності або низької вартості, а оптимальний баланс параметрів спостерігається саме у сталей нового покоління.

На відміну від табличних даних, графічне представлення результатів дозволяє виявити характер впливу окремих параметрів на інтегральну ефективність матеріалів, а також візуалізувати тенденції, які не є очевидними при дискретному порівнянні окремих значень. Слід зазначити, що отримане ранжування матеріалів не є універсальним і може змінюватися залежно від зовнішніх умов. Зокрема, за умов істотного зниження вартості вуглепластиків або впровадження масштабних технологій їх рециклінгу, коефіцієнт K для композитів може зрівнятися або перевищити показники сталей нового покоління. Аналогічно, посилення регуляторних вимог щодо вуглецевого сліду виробництва може зменшити відносну ефективність металевих матеріалів на користь полімерних і біокомпозитних систем.

Таким чином, візуалізація обох залежностей підтверджує, що сталеві AHSS залишаються найбільш збалансованим матеріалом для масового виробництва завдяки оптимальному співвідношенню міцності, густини та вартості. Легкі метали (Al та Mg) демонструють перспективи лише при зниженні їх собівартості. З екологічної точки зору, сталі та алюміній залишаються лідерами за показниками утилізації (95–98 %), тоді як полімерні композити потребують подальших досліджень у сфері замкненого циклу переробки. Найменші викиди CO₂ за життєвим циклом спостерігаються у сталей нового покоління, тоді як виробництво титану характеризується найвищою енергоємністю. У цьому контексті саме розвиток технологій рециклінгу, енергоефективного плавлення та відновлення волокон стане визначальним фактором для переходу до екологічно збалансованого електромобілебудування.

Прогнозування зміни структури матеріалів у виробництві електромобілів ґрунтується на трендовому аналізі числових даних, взятих із технічних звітів IEA (2023–2024), аналітичних оглядів McKinsey (2023), а також матеріалознавчих досліджень Yan (2025) та Ghoshetal. (2024–2025). Для побудови прогнозування застосовано метод композитного тренду, який поєднує екстраполяцію темпів зростання ринку легких металів і композитів, аналіз часток використання матеріалів у сучасних моделях електромобілів, а також зіставлення з вимогами щодо декарбонізації. На основі цих джерел сформовано діаграму (рис. 2), що демонструє очікуване зростання частки композитів та алюмінію, скорочення домінування AHSS і поява сегменту біополімерів.

Методологічною основою прогнозування є підхід, який поєднує екстраполяцію наявних тенденцій використання матеріалів у сучасних моделях електромобілів та експертну оцінку впливу регуляторних і технологічних факторів. Для кожної групи матеріалів аналізувалися середньорічні темпи зміни частки застосування на основі відкритих галузевих звітів та статистичних даних за період 2015–2024 років. Отримані тренди екстраполювалися до 2030 року з урахуванням обмежень, пов'язаних із технологічною готовністю матеріалів та економічною доцільністю їх масового впровадження.

Слід зазначити, що запропонований прогноз не має характеру детермінованого моделювання та не враховує можливих технологічних проривів, змін у законодавстві або різких коливань вартості сировини. Його доцільно розглядати як орієнтовну сценарну оцінку, яка відображає найбільш імовірний напрям розвитку матеріальної структури електромобілів за умов збереження сучасних тенденцій. Такий підхід широко застосовується у матеріалознавчих і техніко-економічних дослідженнях на ранніх етапах аналізу.

Слід підкреслити, що наведені значення часток матеріалів до 2030 року мають інтервальний характер. З огляду на невизначеність економічних, технологічних та регуляторних факторів, похибка прогнозування може становити $\pm 5-7\%$ для окремих груп матеріалів. Тому отримані результати слід трактувати не як точні значення, а як орієнтовні діапазони найбільш імовірного розвитку матеріальної структури електромобілів.



Рис. 3. Прогнозування структури матеріалів у виготовленні електромобілів на 2030 рік

Представлений прогноз свідчить не про витіснення традиційних матеріалів, а про їх функціональну трансформацію в межах багатоматеріальних платформ. Зменшення частки сталей нового покоління супроводжується зростанням використання алюмінію та композитів у тих елементах конструкції, де мінімізація маси має критичне значення. Водночас сталі зберігають ключову роль у силових і енергопоглинаючих зонах, що підтверджує доцільність еволюційного, а не революційного сценарію розвитку матеріалів електромобілів.

Така динаміка свідчить про поступовий перехід галузі від традиційної металомісткої парадигми до інтегрованих багатоматеріальних платформ, де ключову роль відіграють екологічність, переробність і цифровізація виробничих процесів. Очікується, що до 2030 року понад 70 % компонентів електромобіля виготовлятимуться з матеріалів, придатних до повторного використання. Прогноз побудовано на основі аналізу з використанням екстраполяції галузевих даних за 2015–2024 р.

Виконаний аналіз підтверджує, що сталі нових генерацій (AHSS) на даний час лишаються основним конструкційним складником у розробці електромобілів завдяки їхньому ідеальному балансу міцності, ціни та можливостей обробки. Водночас напрямки розвитку сфери вказують на поступовий рух до багатоскладових структур майбутнього, де метали, композити та біополімери з'єднуються у цілісну гнучку конструкційну основу. Такі системи гарантують зниження ваги, зростання енергозбереження та збільшення робочих властивостей частин кузова і ходової частини. Таким чином, результати, узагальнені в таблиці 1 та проілюстровані на графіках 1–3, підтверджують, що ефективність конструкційних матеріалів електромобілів визначається не окремими властивостями, а їх комплексним поєднанням механічних, економічних та екологічних параметрів. Запропонований інтегральний підхід до оцінювання матеріалів дозволяє перейти від інтуїтивного або емпіричного вибору до кількісно обґрунтованих інженерних рішень, спрямованих на зменшення маси електромобіля, підвищення його енергоефективності та зниження собівартості без втрати міцності й рівня безпеки. Отримані результати можуть бути безпосередньо використані на ранніх етапах проектування електромобілів для формування раціональної матеріальної структури кузова та несучих елементів, а також слугувати основою для подальших досліджень, пов'язаних з оптимізацією багатоматеріальних платформ, розвитком технологій рециклінгу та зменшенням вуглецевого сліду транспортних засобів. У більш широкому контексті представлений підхід сприяє формуванню науково обґрунтованих рішень у галузі сталого транспортного машинобудування та підвищенню конкурентоспроможності електричного транспорту на глобальному ринку.

Висновки. Отримані закономірності дозволяють сформулювати узагальнене бачення перспектив розвитку матеріальної структури електромобілів. Очікувану зміну часток основних груп матеріалів у виробництві електромобілів до 2030 року відображено на рисунку 3. Представлене прогнозування свідчить про поступове зменшення домінування сталей AHSS при одночасному зростанні використання алюмінію, полімерних композитів і появи біополімерних матеріалів. Така динаміка зумовлена розвитком технологій рециклінгу, підвищенням вимог до декарбонізації та впровадженням цифрових і адитивних методів виробництва. Водночас прогнозування не передбачає повної відмови від сталей, а вказує на їх інтеграцію в багатоматеріальні платформи відповідно до функціонального призначення елементів конструкції.

У межах запропонованого критерію встановлено, що при вартості матеріалу понад 5 €/кг коефіцієнт матеріальної переваги K різко знижується незалежно від рівня міцності. Це визначає економічну межу доцільності застосування титанових сплавів і вуглепластиків у масовому електромобілебудуванні. Показано, що зменшення густини матеріалу нижче 2 г/см³ не забезпечує автоматичного підвищення конструкційної ефективності без відповідного зростання міцності або зниження вартості, що принципово важливо при оцінці перспектив магнієвих сплавів і композитів. Запропонований підхід демонструє, що ефективний вибір матеріалів для електромобілів визначається не максимізацією окремих властивостей, а пошуком збалансованого компромісу між масою, вартістю, міцністю та умовами серійного виробництва.

Список використаних джерел

1. Ashby M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 6th ed. Elsevier, 2017. — P. 110–145.
2. Yan H. *Lightweight Materials for Electric Vehicles: Trends and Sustainability Challenges*. *Journal of Advanced Manufacturing*, 2025, Vol. 38. — P. 24–39.
3. Ghosh P., Lee J., Zhang T. *Sustainable Material Design for Electric Mobility*. *Materials Today*, 2024, Vol. 56. — P. 112–128.
4. Singh A., Patel R. *Comparative Study of Aluminum and Composite Structures in Electric Vehicle Design*. *Renewable Energy Engineering*, 2023, Vol. 18, No. 2. — P. 201–215.
5. Müller S., Reiter M. *Circular Economy in Automotive Manufacturing: A Review of Recyclable Composites*. *Journal of Cleaner Production*, 2022, Vol. 370. — P. 135–149.
6. -González C., Los Santos-Ortega J. *Environmental and Economic Analyses of TIG, MIG, MAG and SMAW Welding Processes*. University of La Rioja, Spain, 2023. — P. 55–70.
7. Zhao H., Zhang S., Chen H., Li Y. *Methods to Improve TIG Welding Efficiency*. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2024, Vol. 77. — P. 2231–2245.
7. Коржик В. М., Хаскін В. Ю. та ін. Гібридне лазерно-плазмове зварювання: ефективність і нові можливості. *Автоматичне зварювання*, № 12, 2023. — С. 22–30.
8. Советченко Я. В. *Оптимізація технології контактного точкового зварювання в умовах дії промислових факторів*. Київ, 2021. — С. 64–80.
9. Максимов Д. М. *Розробка автоматизованого технологічного процесу зварювання металевих виробів*. Харків: ХНУРЕ, 2025. — С. 48–95.

Дата надходження статті до видання: 28.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення: 14.04.2026

Б. З. Барабаш, І. Т. Ребезнюк^[0000-0001-5924-7700]

Національний лісотехнічний університет України

ДОСЛІДЖУВАННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СИТОВОЇ СИСТЕМИ БАРАБАННИХ ПОДРІБНЮВАЧІВ ДЕРЕВИНИ НА ФРАКЦІЙНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЙНИХ ТРІСОК

Установлено закономірність змінювання величини відсотка некондиційної фракції в загальній масі технологійних трісок залежно від параметрів ситової системи барабанних подрібнювачів деревини. Одержано рівняння регресії, за допомогою якого можна розрахувати відсоток некондиційної фракції з урахуванням кількості секцій східчастого сита, величини радіусної відстані між ситом і барабаном та вологості деревини. Установлено раціональні параметри ситової системи барабанних подрібнювачів деревини.

Ключові слова: барабанний подрібнювач деревини, ситова система, технологійні тріски, східчасте сито, кількість секцій.

B. Barabash, I. Rebezniuk

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE SCREEN SYSTEM PARAMETERS OF DRUM WOOD CHIPPERS ON THE FRACTIONAL COMPOSITION OF INDUSTRIAL WOOD CHIPS

A pattern has been established in the variation of the percentage of substandard fraction of wood chips in the total mass of industrial chips depending on the parameters of the screen system of drum wood chippers. A regression equation was obtained, which can be used to calculate the percentage of substandard fraction, taking into account the number of sections of the stepped screen, the radial distance between the screen and the drum, and the moisture content of the wood. Optimal parameters for the screen system of drum wood chippers have been established.

Keywords: drum wood chipper, screen system, industrial chips, stepped screen, number of sections.

Problem formulation

Improving the efficiency of wood chipping is a pressing task for the woodworking and bioenergy industries due to growing demands for uniformity in the fractional composition of wood chips and energy efficiency in technological processes. In drum wood chippers designed to produce wood chips for fuel pellets, significant losses in productivity and energy consumption are caused by the irrational kinematics of chip particles movement on a smooth cylindrical screen, which results in a large percentage of the chips produced being of substandard size (over 6 mm) and requiring additional chipping (rechipping).

Therefore, improving the design of the screen by giving it a stepped geometry, which changes the conditions for transporting and sorting chips, is an urgent scientific and practical task.

The formation of a homogeneous fractional composition of industrial chips with the lowest possible percentage of substandard fraction in their total mass is a determining factor in the energy and resource efficiency of wood chipping and the effectiveness of the subsequent use of chips. In drum chippers, the conditions for separating particles in the product discharge zone play a significant role, which to a certain extent depend on the design features of the screen surface and its spatial arrangement relative to the chipping drum.

The use of a stepped screen changes the nature of the interaction between chip particles and the working surface, the conditions of their retention within the zone of chipping, and the likelihood of repeated chipping, which directly affects the ratio of standard to substandard fractions.

At the same time, the magnitude of the radial distance between the screen and the drum (the distance between the inner radius of the screen surface and the radius of the working surface of the drum) determines the duration of the chips' staying in the working zone, the intensity of the mechanical impact of the structural components on the wood particles, and the probability of the chips passing through the screen surface. Despite the practical significance of these parameters, their complex influence on the process of forming the fractional composition of industrial chips remains insufficiently substantiated, which necessitates systematic experimental investigation of this issue.

Reviewing the latest studies and publications.

One of the relatively few experimental studies in this field was published in the journal Forests (MDPI) [1], which provides a detailed analysis of the distribution of wood particle sizes depending on the size of the drum chipper screen. The results showed that smaller screen sizes significantly increase the proportion of fine fractions (less than 10 mm) in the total output, while larger screens increase the proportion of medium and large fractions (over 45 mm). This is due to the fact that increasing the size of the screen reduces the time that chips remain in the chipping zone, which reduces the probability of them

being further chipped. For example, when the screen size is reduced from 80 mm to 40 mm, the proportion of fine fractions increases significantly, while the proportion of fractions between 45 and 63 mm decreases or is completely absent.

Currently, all wood chippers [2–4] employ a plate screen of cylindrical shape to sort wood chips, this screen being positioned at a specified distance from the working surface of the drum. An analysis of these technical reviews shows that the design of drum chippers, including the condition of the blades and the presence of a screen, affects the quality (dimensional uniformity) of the chips. Currently, there are no studies on the impact of a stepped screen on the fractionation of industrial chips.

Also, there are no studies on the effect of the radial distance between the screen and the drum in drum-type wood chippers on the fractionation of chips. In existing works, including [1–4], this parameter is considered only indirectly in the context of the size of the screen or operating modes, but not as an independent factor that directly affects the fractional distribution of the chips.

In modern drum wood chippers, the radial distance between the screen and the drum is not a standardized parameter and depends on the design of the specific chipper, the type of screen, and the intended use of the wood chips. Typically, the radial distance is constant along the entire length of the screen [2, 3]. The manufacturers rarely publish this parameter as a separate specification, however, based on technical descriptions, engineering calculations, and operational guidelines, the following typical engineering ranges can be identified

Typical values for the radial distance between the screen and the drum:

- 10–25 mm – for chippers designed to produce relatively fine and uniform chips (increased intensity of re-chipping).
- 25–45 mm – the most common working range for universal drum chippers.
- 45–70 mm – for equipment where priority is given to productivity and the reduction of particle re-fragmentation (most of the large fractions).

Occasionally, a plate-type screen of cylindrical shape is installed in the chipping chamber for industrial chips with different radial distances to the drum: the largest distance is near the lower counter-blade and the smallest is near the upper counter-blade [4]. This arrangement of the screen causes the edges of the holes to form as if in the shape of micro-steps, which finely grind the industrial chips in the chipping chamber like micro-counter knives. With this screen arrangement, the number of large-sized industrial chip particles is reduced, but their chipping is still insufficient.

Based on the analysis of the wood chipping process in drum chippers, the study of their design, operating principle, and the main parameters affecting the size and quality of the obtained chips, stepped plate screens were developed in accordance with the declarative utility model patent [6]. A working model of a drum wood chipper [7] has also been developed, which, by eliminating all secondary factors as much as possible, provides an opportunity to experimentally study, with a high degree of accuracy, the process of chipping wood into industrial chips.

Setting the task.

It is necessary to identify the patterns of influence of the stepped screen design and its radial distance to the working surface of the chipping drum on the formation of the fractional composition of industrial chips. To do this, along with theoretical substantiation, it is necessary to experimentally determine how changes in the geometric parameters of the stepped screen 1 and its relative positioning in the chipping chamber 6 with the knife drum 3 affect the conditions for particles passing through the screen surface, the intensity of their re-chipping, and the proportion of the acceptable fraction in the total product throughput (Fig. 1).

The purpose of the study – to identify the patterns of influence of the number of sections of a stepped screen and the magnitude of the radial distance between the screen and the drum on the percentage of substandard fraction in the total mass of wood chips, and to recommend rational parameters of the screen system (a parameterized stepped volumetric structure of an arc-shaped screen) for drum wood chippers.

Solving the problem.

In order to investigate the influence of the number of sections of the stepped screen, the radial distance between the screen and the drum, as well as wood moisture content on the percentage of substandard fraction in the total mass of chips, a mathematical experiment planning method was used. The experimental variables were as follows: X_1 – number of screen sections n ; X_2 – radial distance between the screen and the drum d , X_3 – wood moisture content W . All the factors are quantitative, controllable, and manageable.

The investigated indicator P_{substd} is the percentage of substandard fraction in the total mass of wood chips.

This indicator was determined as follows:

$$P_{\text{substd}} = (m_{\text{substd}} / m_{\text{tot}})100\%,$$

where m_{substd} is the mass of the substandard fraction of chips (with dimensions exceeding 6 mm), kg;
 m_{tot} is the total mass of chips, kg.

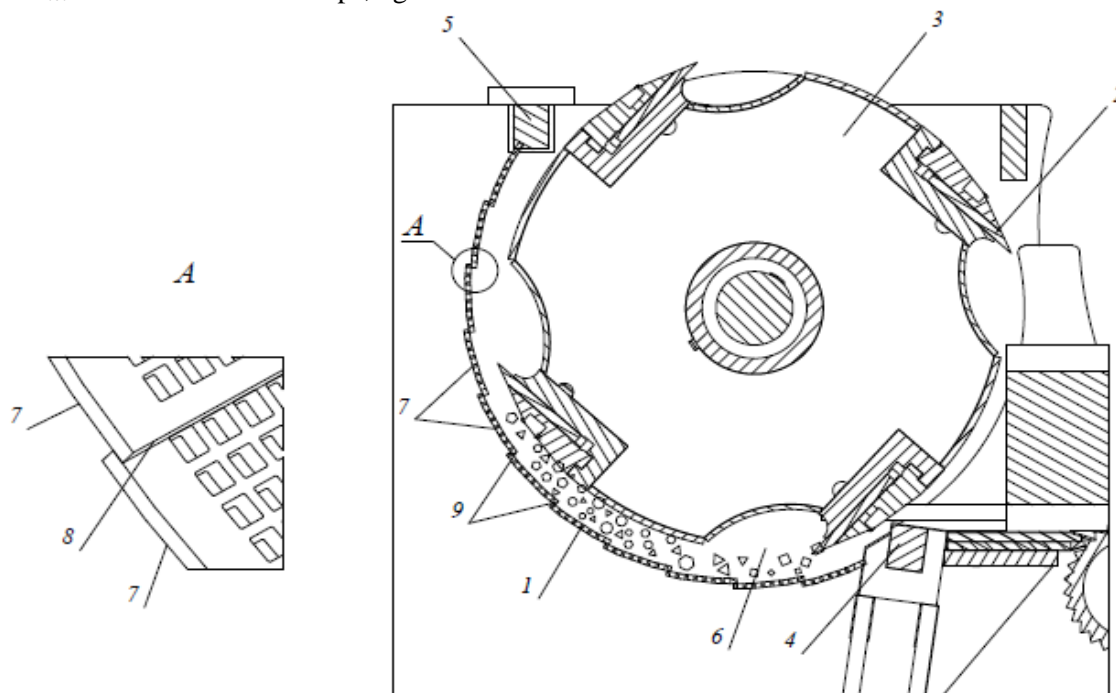


Fig. 1. Structure of a drum wood chipper with a stepped plate screen [4]
 1 – screen; 2 – chipping knife; 3 – knife-equipped drum; 4 – lower counter-blade; 5 – upper counter-blade; 6 – chipping chamber; 7 – section; 8 – longitudinal edge of the section; 9 – steps.

To experimentally investigate the effect of the number of sections on wood chipping productivity, three plate-type screens with identical 8 mm × 8 mm holes and with different numbers of sections (3, 7, 11) were designed and manufactured (Fig. 2). The screen mounting structure is designed in such a way that the screens can be installed on the wood chipper with different radial distances between the screen and the drum.

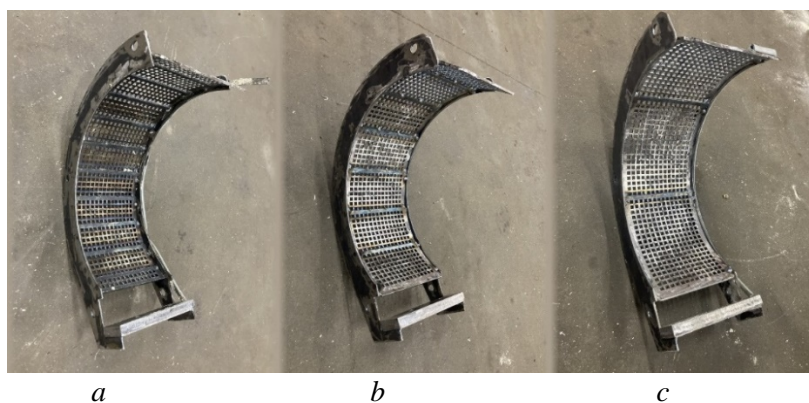


Fig. 2. Stepped screens with different numbers of sections: a – eleven; b – seven; c – three
 The values of the other factors were constant.

To obtain the regression equation for the percentage of the substandard fraction P_{substd} in the total mass of wood chips, a second-order B -plan was applied. It is assumed a priori that the factors are interrelated and that the process under study is described with sufficient accuracy by a second-order polynomial.

The mathematical model of the process takes the form:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} X_i X_j,$$

where y is the value of the output parameter; b_0 is the intercept term of the regression equation; b_i , b_{ii} , b_{ij} are coefficients that express the effects of the first- and second orders, and pairwise interactions; X_i , X_j are independent variables; k is the number of factors being studied.

Description of the identified key variables is presented in Table 1.

Table 1

Variable factors and conditions for their variation

Variable Factors	Designation	Рівні варіювання Variation levels			Variability interval
		Lower (-)	Middle (0)	Upper (+)	
X_1 – the number of screen sections, pcs	n	3	7	11	4
X_2 – radial distance between the screen and the drum, mm	d	15	20	25	5
X_3 – wood moisture content, %	W	20	30	40	10

For the specified plan, levels and variability intervals were selected in the range of interest (see Table 1).

The formulas linking normalized and natural designations of factors are as follows:

$$X_1 = \frac{n - 7}{4}; X_2 = \frac{d - 20}{5}; X_3 = \frac{W - 30}{10}.$$

To avoid systematic errors arising from the influence of uncontrolled input factors, the tests were randomized prior to the experiment, according to [7], and the experiments were performed in accordance with the obtained sequence of tests (Table 2).

Table 2

Experiment planning matrix in normalized designations

Test number	Sequence of conducting three repeated tests	X_1	X_2	X_3
1	5, 11, 23	-1	-1	-1
2	22, 24, 41	+1	-1	-1
3	9, 28, 32	-1	+1	-1
4	21, 36, 39	+1	+1	-1
5	4, 15, 27	-1	-1	+1
6	7, 14, 20	+1	-1	+1
7	6, 8, 30	-1	+1	+1
8	25, 31, 33	+1	+1	+1
9	2, 13, 19	-1	0	0
10	1, 17, 34	+1	0	0
11	3, 10, 29	0	-1	0
12	18, 26, 37	0	+1	0
13	12, 35, 38	0	0	-1
14	16, 40, 42	0	0	+1

In addition to fourteen tests of the orthogonal part of the plan, three tests were conducted under conditions corresponding to the middle level, which are necessary, in particular, to verify the adequacy of the hypothesis.

The experimental data were processed using the KoefRR 5.0 program, developed at the Department of Technological Machines and Technical Service of the Ukrainian National Forestry University, according to [7].

As a result of computerized processing of the experimental study results, regression coefficients were obtained. The regression equations (in normalized factor designations) for the percentage of substandard fraction in the total mass of industrial chips P_{substd} are as follows:

$$P_{\text{substd}} = 19.52 - 0.53X_1 + 9.92X_2 - 0.21X_3 + 0.84X_1^2 + 0.99X_2^2 - 0.56X_3^2 + 1.3X_1X_2 - 0.3X_1X_3 + 0.58X_2X_3$$

The calculation of the Fisher F-criterion confirms the adequacy of the equation ($F_{\text{calc}} = 1.39 < F_{\text{crit}} = 4.53$).

Analyzing the regression equation in normalized factor designations, the following conclusions can be drawn.

Of all the factors studied, the radial distance between the screen and the drum, d ($b_2 = 9.92$), influences most significantly on the percentage of substandard fraction in the total mass of chips, P_{substd} , to a lesser extent - the number of screen sections, n ($b_1 = -0.53$), and the least effect on the percentage of substandard fraction is produced by the wood moisture content, W ($b_3 = -0.21$). The dependence of P_{substd} on all the factors within the studied range is nonlinear, since $b_{11} = -0.84$; $b_{22} = 0.99$; $b_{33} = -0.56$.

Among the various factors affecting P_{substd} , the most significant is the interrelationship between the number of screen sections and the radial distance between the screen and the drum ($b_{13} = 1.3$). The relationship of the radial distance between the screen and the drum with the moisture content of the wood ($b_{23} = 0.58$) has a less significant effect on the percentage of the substandard fraction in the total mass of chips, and the relationship between the number of screen sections and wood moisture content ($b_{13} = -0.3$) has the least significant effect. A plus sign “+” next to the coefficient means that as this coefficient increases, the percentage of P_{substd} increases, while a minus sign “-” means that the percentage of P_{substd} decreases.

Thus, the analysis of the regression equation shows that variations in the number of screen sections and the radial distance between the screen and the drum in wood chippers will affect the percentage of substandard fraction in the total mass of chips (Fig. 3). Moreover, this effect occurs in interaction with the moisture content of the wood.

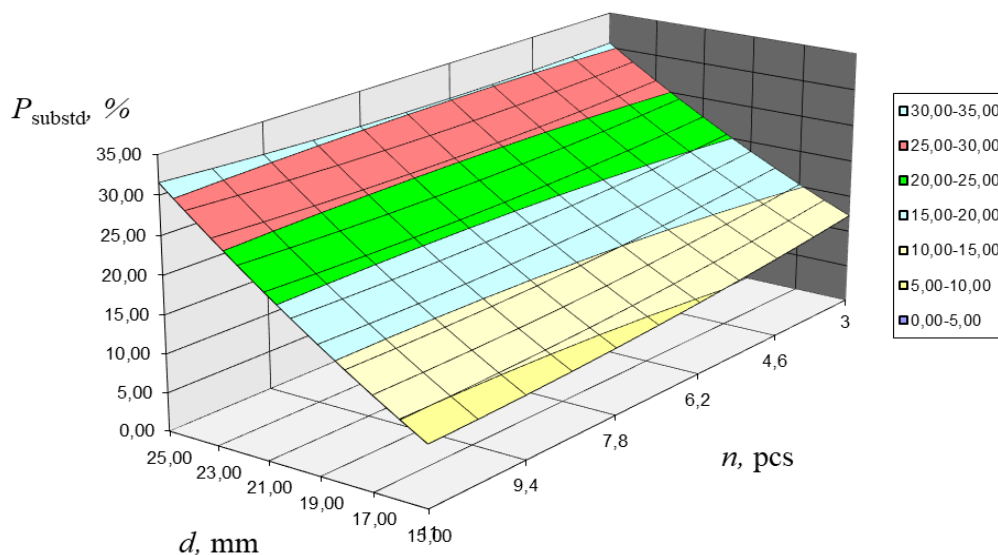


Fig. 3. Graph showing the dependence of the percentage of substandard fraction of industrial wood chips in their total mass on the number of screen sections n and the radial distance between the screen and the drum d (wood moisture content $W = 40\%$).

The results of the experimental study showed that the lowest percentage of substandard wood chips was obtained when the radial distance between the screen and the drum was the smallest – 15 mm (Fig. 4). When the distance is reduced from 25 mm to 15 mm, the percentage of substandard wood chips decreases most rapidly when the wood moisture content is $W = 40\%$, ranging from 31.54 % (for 25 mm) to 7.95 % (for 15 mm). In general, with the reduction in the radial distance between the screen and the drum, the percentage of substandard wood chips decreases approximately fourfold (by 75 %).

The second parameter in terms of its impact on reducing the percentage of substandard chips is the number of sections on the screen. At a radial distance of 15 mm between the screen and the drum and when the humidity is 40 %, the percentage values decrease from 12.21 % for a screen with three sections to 7.95 % for a screen with 11 sections (see Fig. 4). In general, when the number of sections in the screen increases from 3 to 11, the percentage of substandard industrial chips in the total mass of chips decreases by approximately 35 %. When the radial distance is 20 mm, this percentage decreases by approximately 10 % when the number of sections in the screen increases from three to 11, and at a distance of 25 mm, it even increases by approximately 3 %.

When the moisture content increases from $W = 20\%$ to $W = 40\%$, with a distance of 15 mm between the drum and the screen, the percentage of substandard industrial chips in their total mass decreases to 23 % ($n=11$).

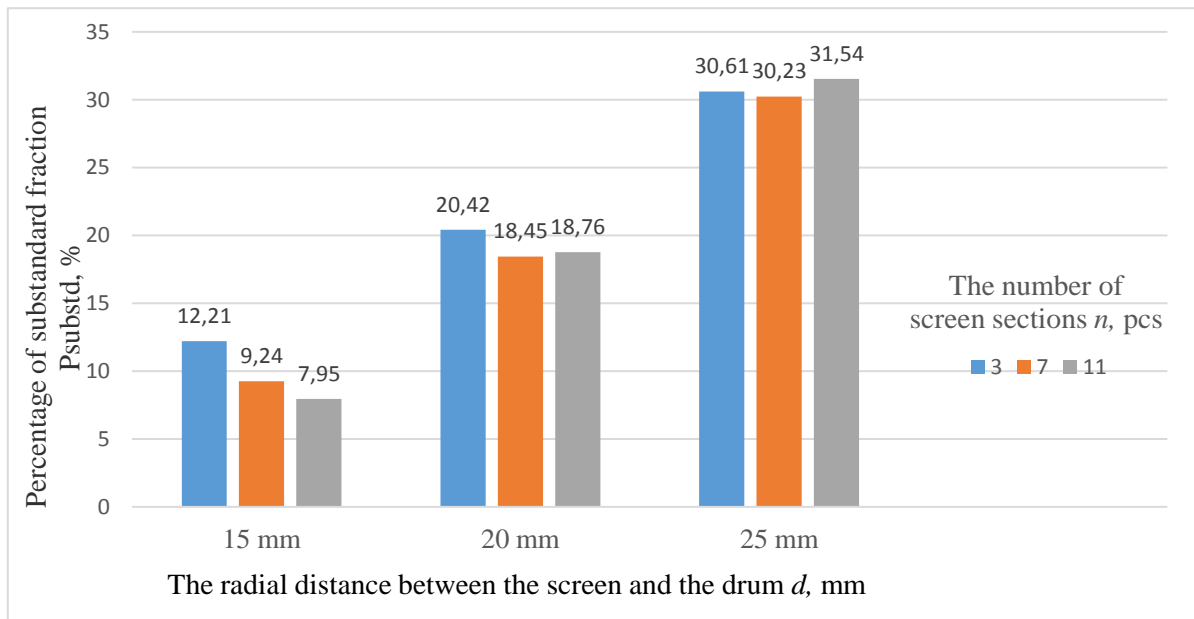


Fig. 4. Diagram showing the change in the percentage of substandard fraction of wood chips depending on the number of sections in the stepped screen and the radial distance between the screen and the drum (wood moisture content $W = 40\%$)

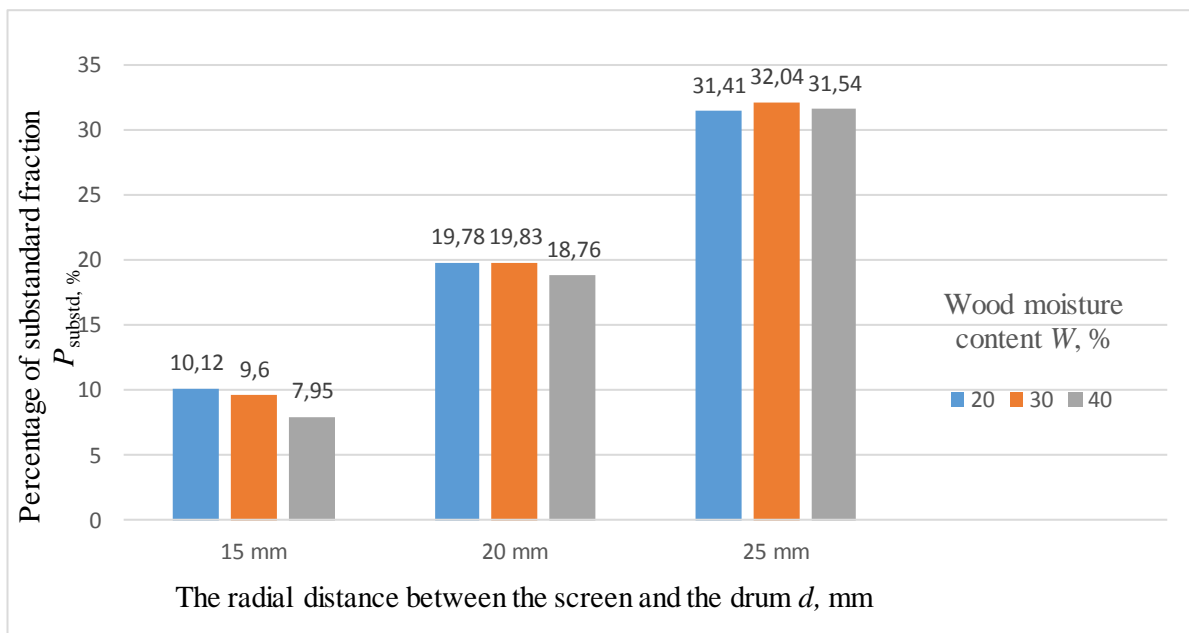


Fig. 5. Diagram showing the change in the percentage of substandard chips in the total mass of chips depending on the radial distance between the screen and the drum and the moisture content of the wood (the number of screen sections is 11)

However, at a longer radial distance between the drum to the screen of 20 mm, the percentage of substandard fraction of industrial chips in their total mass decreases slightly - by up to 5 %—as the wood moisture content increases from $W = 20\%$ to $W = 40\%$. And when $d = 25$ mm, the percentage of substandard industrial chips in their total mass begins to increase.

Conclusions

1 A pattern has been identified in the change in the percentage of substandard fraction in the total mass of wood chips depending on the parameters of the screen system of drum wood chippers. A regression equation was obtained, which can be used to calculate the percentage of substandard fraction, taking into

account the number of sections of the stepped screen, the radial distance between the screen and the drum, as well as the moisture content of the wood.

2 The experimental investigation revealed that an increase in the number of sections of the stepped screen leads to a decrease in the percentage of substandard industrial chips in their total mass. Therefore, it is advisable for a stepped screen to have 11 sections. Further increasing the number of sections in the stepped screen will increase the hydrodynamic resistance of the chips and the energy consumption of the process.

3. It has been revealed that, among the factors studied, the reduction in the radial distance between the screen and the drum has the most significant impact on the decrease in the percentage of the substandard fraction. It has been found that the most optimal distance is 15 mm.

4. Based on the study, it is recommended to use the following optimal parameters for the screen system of drum wood chippers: the number of sections of stepped screens is 11, and the radial distance between the screen and the drum is 15 mm.

References

1 Choi, Y.S., Cho, M.J., Paik, S.H., Mun, H.S., Kim, D.H., Han, S.K., Oh, J.H. (2019). Factors affecting the chipping operation based on the screen size of the drum chipper. *Forests*, Vol. 10 (11), pp. 1029. Access:<https://doi.org/10.3390/f10111029> (accessed on 28 February 2026)

2 Vecoplan chippers (Germany). Wood chipping. Operational principle. Access: <https://www.youtube.com/watch?v=tYiHvrZCJUE&list=PLdF2be0FyTNKnyBDcWj4zEvMuNBDzY-rs&index=1> (accessed on 28 February 2026)

3 Rudnick&Enners. Maschinen- und Anlagenbau GmbH. Chipping equipment. Access: <https://www.rudnick-enners.com/ru/produkte/zerkleinerung/index.html> (accessed on 28 February 2026).

4 HAAS DRUM CHIPPER HTH. Type HTH. Systems and concepts for all applications : HHAS Recycling-systems. Access: https://haas-recycling.de/wp-content/uploads/2018/01/HAAS-Recycling_leaflet-HTH-Drum-Chipper_UK_20190802.pdf (accessed on 28 February 2026)

5 Screen of a drum wood chipper: patent for utility model No. 158361 Ukraine IPC (2025.01) B27L 11/00 B02C 18/00. No, u2024 04112; filed 16 August 2024; published 22 January 2025. Bulletin No. 4. 4 p.

6 B. Barabash, I. Rebezniuk. Experimental equipment for determination of rational cutting modes in drum wood chippers. SCIENTIFIC NOTES Interuniversity Collection of Scientific Papers (in the fields of "Physical and Mathematical Sciences" and "Technical Sciences") Lutsk 2025. Issue 82:128–134. DOI:10.36910/6775.24153966.2024.77.20.

7 Pylypchuk, M.I.; Grygoriev, A.S.; Shostak, V.V. (2007). Fundamentals of Scientific Research: Textbook. Kyiv: Znannya, 270 pp. [in Ukrainian].

Рецензент: Гасій О., доктор технічних наук, професор кафедри прикладної механіки і технології машинобудування.

Дата надходження статті до видання: 08.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

В.В. Ковалишин^[0000-0003-0642-6777], В.І. Чайковський^[0009-0008-1127-5997]

Національний університет "Львівська Політехніка"

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ РУХУ МІСЬКОГО ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

У статті розглянуто проблему прогнозування руху міського громадського транспорту в умовах зростання мобільності населення, підвищення інтенсивності транспортних потоків та розвитку інтелектуальних транспортних систем. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності прогнозування часу прибуття транспорту на зупинку, часу руху між зупинками, інтервалів руху та завантаженості транспортних засобів для покращення якості транспортного обслуговування населення.

Метою роботи є аналіз сучасних методів прогнозування руху міського громадського транспорту, визначення їх переваг і недоліків, а також оцінка перспективних напрямів розвитку систем прогнозування в умовах динамічного міського середовища. Особлива увага приділяється можливості застосування різних підходів залежно від доступності даних, обчислювальних ресурсів та особливостей транспортної інфраструктури.

У роботі проаналізовано статистичні методи прогнозування, зокрема моделі часових рядів, регресійний аналіз, метод ковзного середнього, ARIMA та SARIMA-моделі. Показано, що ці підходи залишаються ефективними для короткострокового прогнозування у відносно стабільних транспортних системах завдяки простоті реалізації, швидкості обчислень і зрозумілій математичній інтерпретації, проте мають обмеження у врахуванні нелінійних залежностей і впливу зовнішніх чинників.

Окремо розглянуто фільтраційні методи, зокрема фільтр Калмана, який застосовується для оцінювання стану транспортної системи в реальному часі на основі даних GPS, AVL та сенсорної інформації. Також досліджено методи машинного навчання, глибокого навчання, нейронні мережі та графові моделі, які забезпечують вищу точність прогнозів за рахунок здатності моделювати складні просторово-часові та нелінійні залежності у транспортних потоках.

Встановлено, що найбільш перспективними є гібридні та просторово-часові моделі, які поєднують переваги статистичних, фільтраційних і нейромережових підходів. Такі моделі дозволяють досягати високої точності прогнозування в умовах значної варіативності трафіку, адаптуватися до змін транспортної ситуації та працювати з великими обсягами різномірних даних.

Узагальнено, що вибір методу прогнозування має базуватися на типі транспортної задачі, якості та структурі вхідних даних, а також вимогах до швидкодії та точності системи. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для розроблення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, удосконалення управління міським громадським транспортом, оптимізації маршрутів і розкладів, а також підвищення надійності та доступності міських перевезень.

Ключові слова: громадський транспорт, прогнозування тривалості руху, транспортні потоки, часові ряди, машинне навчання, нейронні мережі, фільтр Калмана, гібридні методи, просторово-часові моделі, інтелектуальні транспортні системи.

V. Kovalyshyn, V. Chaikovskiy

ANALYSIS OF METHODS FOR FORECASTING URBAN PUBLIC TRANSPORT MOVEMENT

The article presents the results of a study the problem of forecasting urban public transport movement under conditions of increasing mobility demand, growing traffic intensity and the need to improve intelligent transport systems. Accurate prediction of vehicle arrival time, travel time between stops, service headways, and vehicle occupancy is essential for route optimization, timetable planning, and improving passenger service quality. The research is motivated by the fact that transport systems operate in a highly dynamic environment influenced by congestion, weather conditions, infrastructure disruptions, and fluctuations in passenger demand.

Analyzed the main methodological approaches used for forecasting urban public transport movement. These include statistical time-series methods (particularly regression analysis, moving average techniques, and ARIMA/SARIMA models), filtering approaches based on the Kalman filter, machine learning and deep learning methods, neural network architectures, hybrid and spatio-temporal models. Particular attention is paid to the strengths and limitations of each approach, their data requirements, computational complexity, and suitability for real-time applications in urban transport systems.

The results show that statistical models remain useful for baseline forecasting due to their simplicity, transparency, and low computational cost, but their ability to capture nonlinear and rapidly changing transport conditions is limited. Kalman filter are effective for short-term real-time estimation when streaming GPS and sensor data are available. Machine learning, deep learning, and graph-based neural network models demonstrate higher predictive accuracy because they can process large-scale heterogeneous data and represent complex temporal and spatial dependencies. Hybrid models that combine statistical and artificial intelligence methods achieve the best overall performance in highly dynamic urban environments.

Keywords: public transport, travel time prediction, traffic flows, time series, machine learning, neural networks, Kalman filter, hybrid methods, spatio-temporal models, intelligent transportation systems.

INTRODUCTION

In the modern urban environment, the growth of population mobility and the constant increase in traffic intensity require the improvement of intelligent transport systems (ITS) for the effective management of urban public transport [1]. Therefore, forecasting urban public transport movement has become a key component for route optimization, timetable planning, and improving the quality of passenger service,

© В.В. Ковалишин, В.І. Чайковський

including the prediction of vehicle arrival time at stops, travel time between stops, service headways, and vehicle occupancy levels.

With the increasing number of vehicles and passenger demand, as well as the dynamic changes in the urban environment, accurate and timely forecasting becomes critically important for reducing congestion and improving the efficiency of the transport system [2]. The demand for high-precision forecasts is growing alongside changes in demographic structure, urbanization processes, and the increasing requirements for environmentally sustainable development [3].

A serious challenge in the development of forecasting algorithms lies in the high variability and multi-factor nature of transport system parameters. These parameters include temporal and spatial irregularities of traffic flows, the influence of non-recurrent mobility patterns (such as large-scale events or seasonal fluctuations), external factors (weather conditions, traffic incidents, infrastructure maintenance), as well as difficult-to-predict passenger behavior characteristics [4]. Another critical barrier to improving forecasting accuracy is traffic congestion, which disrupts transport schedules in real time and reduces the reliability of planned operational data [5].

Considering the relevance of forecasting urban public transport movement, it is important to highlight the wide range of modern approaches currently applied in this field. These include statistical time-series models (regression analysis, moving average methods, and ARIMA models), filtering techniques for real-time data estimation (Kalman filter), machine learning algorithms, neural networks, hybrid methods, and spatio-temporal models [6-7]. In particular, studies by Antonio Comi and colleagues demonstrate the high potential of time-series approaches and artificial intelligence methods in improving forecasting accuracy and enhancing the adaptability of transport systems [8-10].

Despite significant progress in this area, identifying the most effective methods under specific urban conditions remains a subject of ongoing scientific discussion. Therefore, a comprehensive analysis of modern methodologies and approaches to forecasting urban transport movement is an essential task for ensuring the efficient functioning of transport infrastructure under increasing urbanization.

ANALYSIS OF LITERATURE DATA AND FORMULATION OF THE PROBLEM

Current research in the field of urban public transport forecasting are focused on the development of algorithms capable of addressing the high variability of traffic flows caused by demand uncertainty, traffic congestion, and external factors such as weather conditions. In European countries, considerable attention is given to the integration of machine learning techniques with traditional approaches in order to improve model accuracy and robustness [8; 11].

Time series methods (ARIMA, SARIMA) remain widely used due to their simplicity of implementation and mathematically grounded approach to analyzing historical data. For instance, studies by Janicka, L., and Christofa, E. [12] have demonstrated that these methods achieve satisfactory performance for medium-term forecasting in relatively stable transport networks, although they exhibit limitations under conditions of fluctuating passenger behavior or unstable traffic conditions [13].

The Kalman filter, widely used in modeling both deterministic and stochastic processes, is also extensively applied in transport modeling tasks. This method enables real-time estimation of the transport system state based on data streams obtained from sensors and GPS devices. Studies indicate that adapting the classical Kalman filter for the analysis of large-scale transport data and the integration of multiple data sources can significantly improve the accuracy of traffic parameter forecasting [14–15].

Machine learning and deep learning methods have become the foundation of many innovations in transport forecasting over the past decade. Studies [16] have demonstrated that the use of recurrent neural networks (RNN) and variational autoencoders enables not only the prediction of transport movement but also the optimization of route schedules depending on the time of day and other influencing factors.

In turn, *hybrid approaches* that combine multiple methodologies (e.g., the integration of ARIMA models with neural networks) have attracted particular interest among researchers, especially in Europe. As argued in [17-19], such combined models achieve superior performance under highly dynamic traffic conditions, allowing them to adapt to sudden changes in transport system behavior.

Based on the literature review, it can be concluded that the most promising directions of development at the current stage involve the integration of big data with artificial intelligence systems and the advancement of adaptive models capable of learning under changing real-world conditions. However, the complexity of such models requires substantial computational resources and careful parameter tuning to ensure sufficient forecasting accuracy.

At the same time, the use of mathematical approaches, including regression analysis, time-series methods, and machine learning techniques, continues to demonstrate high effectiveness in solving forecasting problems, provided that high-quality data preprocessing is ensured [8, 19].

An important challenge remains the availability, systematization, and updating of data for transport movement forecasting, as well as the consideration of external factors such as changes in weather conditions (rain, snow, ice), road maintenance, and other unforeseen events. Improving transport forecasting requires the integration of diverse data sources, including GPS systems (vehicle coordinates, speed, and direction), Automatic Vehicle Location (AVL) systems, Automatic Passenger Counters (APC), Automated Fare Collection (AFC) systems, IC card data, data from mobile network operators, and traffic sensors [11, 20, 21].

Thus, the analysis of existing methods for forecasting urban public transport movement indicates the necessity of developing universal platforms capable of adapting to dynamic changes in the system. This creates opportunities for the implementation of smart transportation systems that can optimize passenger travel time and the operational resources of transport operators.

RESEARCH QUESTIONS

- RQ1. To analyze modern methods for forecasting urban public transport movement, including statistical time-series models, filtering techniques, machine learning and deep learning algorithms, neural networks, hybrid methods, and spatio-temporal models.
- RQ2. To evaluate the advantages and disadvantages of each method in order to determine their effectiveness under diverse urban transport infrastructure conditions.
- RQ3. To identify promising directions for improving forecasting systems with a focus on speed, scalability, and adaptability to dynamic conditions.

RESEARCH RESULT

Modern urban public transport forecasting systems are based on the integration of heterogeneous data sources, their preprocessing, and the application of advanced analytical methods. The primary sources of information include GPS monitoring data, passenger flow indicators, road conditions, and weather factors, which form the basis for developing predictive models of transport processes [18, 22].

At the preprocessing stage, data filtering, aggregation, and synchronization are performed, which are critically important for improving forecasting accuracy under conditions of large-scale and heterogeneous data [23]. Further analysis is carried out using various approaches, including statistical time-series models, filtering techniques, and machine learning and deep learning algorithms, each of which offers specific advantages depending on the nature of the data and the forecasting task [18, 24].

Recent studies indicate that hybrid approaches, which combine multiple methods and account for both temporal and spatial dependencies in transport systems, are the most effective, providing high forecasting accuracy in real-time applications [22, 25].

Thus, the structural scheme of the transport movement forecasting system (Fig. 1) reflects the sequence of data processing stages – from data acquisition to the generation of predictive information – used within intelligent transportation systems to support decision-making and improve the efficiency of urban transport operations.

Statistical forecasting methods based on historical data and time series

Among the methods used for forecasting public transport travel time, time-series-based approaches occupy a leading position. Comi, A., Nuzzolo, A., Brinchi, S., and Verghini, R. [8] analyzed the variability of bus travel time on routes in the city of Rome (Italy) using data from Automatic Vehicle Location (AVL) systems and Automatic Vehicle Counters (AVC). The results of the study revealed a significant influence of temporal factors (time of day and day of the week) on travel time variability and confirmed the similarity between bus travel time patterns and overall traffic flow dynamics. In particular, it was found that the variance of travel time is higher during the evening peak period compared to the morning peak.

Comi and Polimeni [9] proposed a time-series-based approach for forecasting travel time using Automatic Vehicle Monitoring (AVM) data from bus routes in Rome (Italy) and Lviv (Ukraine). The comparison of these two cities, which differ significantly in size and economic structure, revealed that travel time patterns are primarily determined by the intensity of traffic congestion associated with lifestyle characteristics and working hours, rather than by city size. In both cities, buses operated within mixed traffic conditions alongside other vehicles, which had a significant impact on their travel speed.

Comi, Zhuk, Kovalyshyn and Hilevych [10] demonstrated the effectiveness of time-series-based approaches for forecasting bus travel time in Lviv (Ukraine). The authors showed that, among the numerous factors influencing public transport operations, the majority follow specific temporal patterns. This enables the effective application of time-series methods for forecasting and reducing the gap between actual and scheduled travel times.

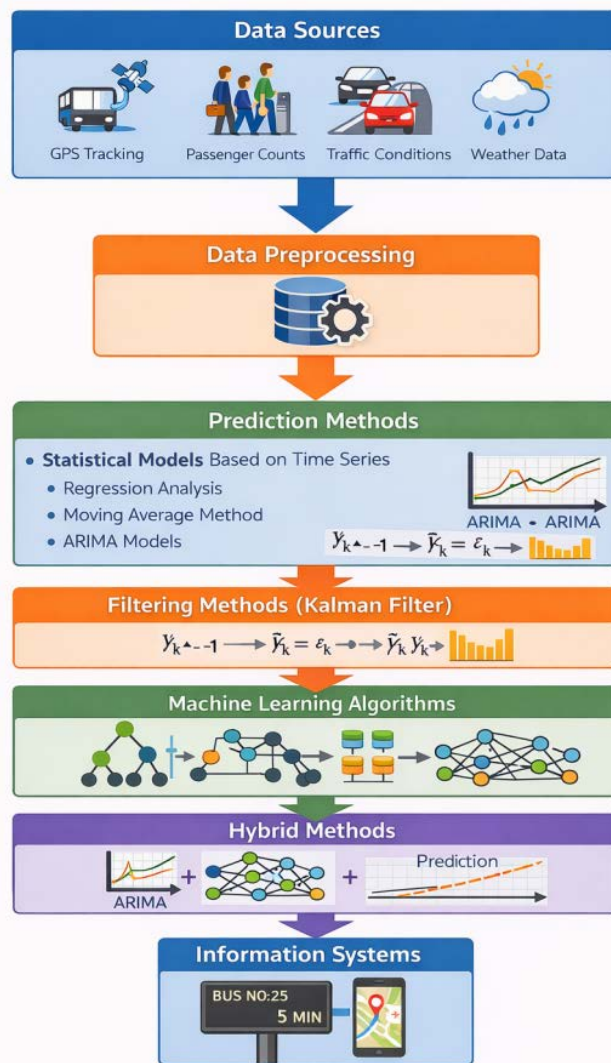


Fig. 1. Structural scheme of an urban transport movement forecasting system based on multi-source data integration and advanced predictive methods

Nuzzolo and Comi [11] examined methodological issues related to the development of short-term forecasting tools for intelligent transportation systems (ITS). The authors emphasized that the collection and processing of large-scale transit data (big data), as well as passenger interaction with system control centers for forecasting optimization, create new opportunities for improving forecasting methods.

ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) models and their seasonal variant, SARIMA, are widely used for forecasting bus travel time [26]. These models combine autoregressive components, differencing, and moving average terms.

The main advantages of ARIMA models include:

- effective performance in modeling time-series data;
- clear mathematical interpretation.

However, their limitations include the complexity of parameter selection and a limited ability to incorporate multiple influencing factors.

The general ARIMA(p, d, q) model is defined by the following equation [26]:

$$Y^d_t = c + \phi_1 Y^{d-1}_t + \dots + \phi_p Y^{d-p}_t + \epsilon_t + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q}, \quad (1)$$

where Y^d_t – is the differenced time series of order d ; c – constant; ϕ_1, \dots, ϕ_p – autoregressive parameters of order p ; $\theta_1, \dots, \theta_q$ – moving average parameters of order q ; ϵ_t – error term (white noise).

The advantages of statistical time series forecasting methods include simplicity of formulation, high computational efficiency, and a relatively small number of operational variables. However, their main limitation lies in the restricted ability to model complex nonlinear traffic dynamics and high variability caused by external factors.

Filtering Methods (Kalman Filter)

The Kalman filter is widely used for predicting bus arrival times, demonstrating high accuracy in short-term forecasting. Zhang, Lauber, Liu et al. [20] proposed a bus travel time prediction model based on

the Kalman filter using multi-source data (AVL and IC card data) applied to the transport network of Madison, Wisconsin (USA). The results showed that, given the availability of multi-source data, the model is capable of meeting forecasting accuracy requirements, with route-level predictions being more accurate than predictions for individual segments between stops.

Jairam, Kumar, Arkatkar and Vanajakshi [27] conducted a comparative analysis of bus travel time prediction models in several Indian cities (Surat, Mysuru, and Chennai), using k-NN, the Kalman filter, and ARIMA methods. The study confirmed that the Kalman filter provides high accuracy for one-step-ahead forecasting and is capable of processing large volumes of data.

The Kalman filter algorithm consists of two main stages: prediction and update.

Prediction stage:

$$\hat{x}_{t|t-1} = F \cdot \hat{x}_{t-1|t-1} + B \cdot u_t, \tag{2}$$

$$P_{t|t-1} = F \cdot P_{t-1|t-1} \cdot F^T + Q, \tag{3}$$

Update stage:

$$K_t = P_{t|t-1} \cdot H^T \cdot (H \cdot P_{t|t-1} \cdot H^T + R)^{-1}, \tag{4}$$

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t \cdot (z_t - H \cdot \hat{x}_{t|t-1}), \tag{5}$$

$$P_{t|t} = (I - K_t \cdot H) \cdot P_{t|t-1}, \tag{6}$$

where \hat{x}_t – status assessment (estimated travel time); F – state transition matrix; P – error covariance matrix; K – Kalman coefficient; H – observation matrix; Q and R – covariances of process and measurement noise; z_t – actual observation.

The advantages of this method include high accuracy in one-step-ahead forecasting and the ability to process large volumes of data in real time. However, its main limitation is reduced effectiveness under conditions of complex nonlinear traffic dynamics and high variability of external factors.

Machine learning and deep learning methods

Machine learning methods, particularly artificial neural networks, have attracted significant attention due to their ability to model complex nonlinear relationships and integrate diverse types of data. A typical neural network architecture for travel time prediction (Fig. 2) consists of an input layer that receives data from multiple sources (AVL/GPS data, time of day, day of the week, weather conditions, passenger flow, and historical data), one or more hidden layers with activation functions (such as sigmoid, ReLU, and tanh), and an output layer that generates travel time predictions (ETA – Estimated Time of Arrival).

Depending on the problem type and data characteristics, various neural network architectures are applied, including fully connected networks, recurrent neural networks (particularly LSTM), graph neural networks (GNN), convolutional neural networks (CNN), and transformer-based architectures [28].

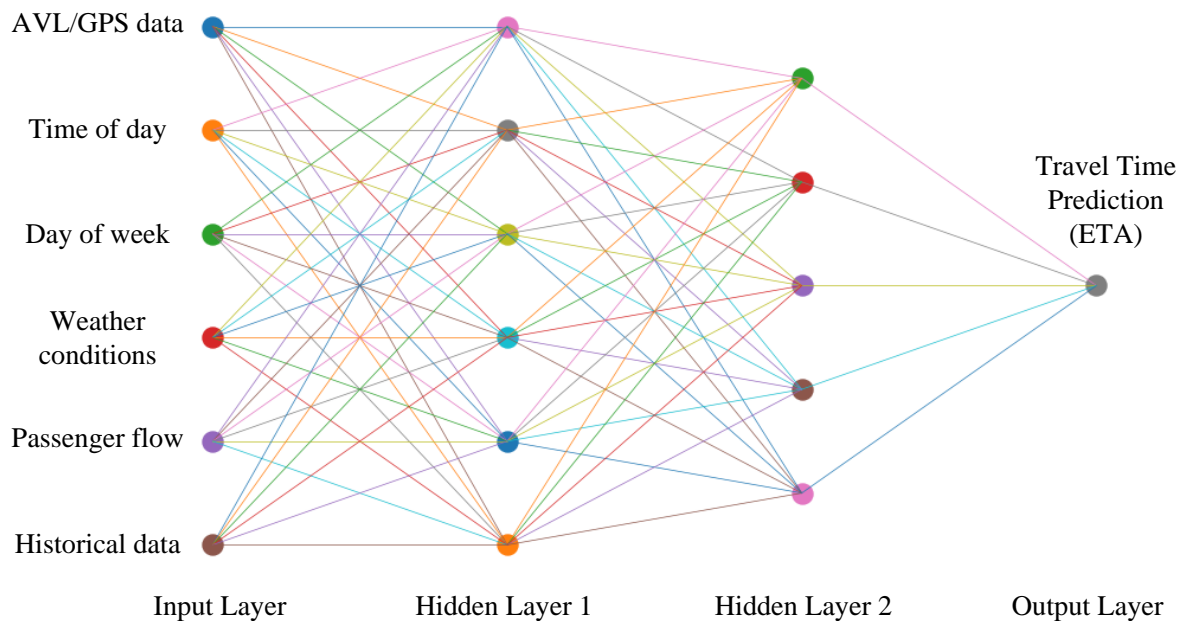


Fig. 2. Neural Network Architecture for Travel Time Prediction

Rashvand [28] proposed a methodology based on a fully connected neural network for predicting bus arrival times in New York City. The study identified an average delay of approximately eight minutes between scheduled and actual arrival times, highlighting the need for accurate predictive models. The model

incorporated factors such as day type (weekday/weekend), peak hour status, and the distance to the next stop.

Approaches based on graph neural networks (GNN) are rapidly evolving, as they enable the incorporation of transport network topology into forecasting models. Baghbani, Bouguila and Patterson [29] proposed a graph convolutional network with recurrent layers for short-term passenger flow prediction across 929 bus stops in Laval (Canada). This approach effectively captures spatio-temporal correlations between different stops and routes, representing a significant advantage over models that treat each stop independently.

Neural network methods are characterized by their ability to model complex nonlinear relationships, integrate heterogeneous data sources, and adapt to dynamically changing conditions. However, their limitations include the requirement for large volumes of high-quality training data and substantial computational resources, as well as sensitivity to noisy data (e.g., GPS signal loss and human-related factors), which may reduce forecasting accuracy.

Hybrid and combined approaches

A promising direction involves the integration of different methods within hybrid models. Nuzzolo and Comi [21] developed an approach for identifying dynamic optimal routing strategies in intelligent stochastic transit networks, which includes a system for forecasting bus travel time and arrival time at stops. Such an approach enables the provision of optimal route predictions to passengers in real time, taking into account the stochastic nature of the transport network, where actual bus arrival times may significantly differ from scheduled or predicted values.

The advantages of hybrid approaches lie in their ability to compensate for the limitations of individual methods and to achieve higher forecasting accuracy. However, their main drawbacks include implementation complexity, the need for tuning a large number of parameters, and scalability challenges for large transport networks with hundreds of routes.

Comparative analysis of methods

Urban public transport forecasting has been extensively studied in recent years, with researchers increasingly employing advanced analytical and data-driven approaches depending on data availability, computational resources, and the complexity of transport systems. Contemporary studies still acknowledge the relevance of statistical time-series models, such as regression analysis and ARIMA-based approaches, which remain effective for short-term forecasting and baseline modelling of traffic flow and passenger demand [24, 30].

At the same time, traditional methods have been enhanced and extended through hybridization and integration with real-time data sources. In particular, filtering techniques, including the Kalman filter and its modifications, are widely used for real-time estimation and prediction of dynamic traffic states, especially in applications involving connected vehicles and sensor-based monitoring systems [31-32].

With the rapid growth of intelligent transportation systems and big data technologies, machine learning methods have become a dominant approach in transport forecasting. These methods enable efficient processing of large-scale heterogeneous data and identification of nonlinear relationships in traffic patterns [17, 23]. Countries such as China, the United States, and Singapore actively implement these techniques in smart mobility systems and urban traffic management.

More recently, deep learning models, including recurrent neural networks (RNN), long short-term memory (LSTM), and graph-based neural networks, have demonstrated superior performance in predicting traffic flow, travel time, and congestion levels [22, 25]. These approaches are particularly effective in data-rich environments and are widely applied in technologically advanced countries such as China, South Korea, and the United States.

The latest research trends focus on spatio-temporal and hybrid models, which integrate statistical methods, machine learning, and deep learning techniques to capture both temporal dynamics and spatial dependencies in transport networks. Such models have shown significant improvements in forecasting accuracy and robustness under highly dynamic urban conditions [20, 23].

Distribution of urban transport forecasting methods used in different countries according to the scientific literature (Fig. 3).

The evolution of methods for forecasting urban public transport movement reflects a gradual advancement of approaches in transportation system research. In the early stages, statistical models based on historical data – such as route characteristics and timetables – played a dominant role, enabling the development of baseline predictive frameworks. Early studies from the mid-20th century primarily relied on simplified empirical models that described traffic behavior using aggregated observations. With the advancement of computational technologies, these approaches were further refined through the integration

of regression analysis and time-series techniques, allowing for more accurate estimation of travel time and operational parameters [1,4,13,29].

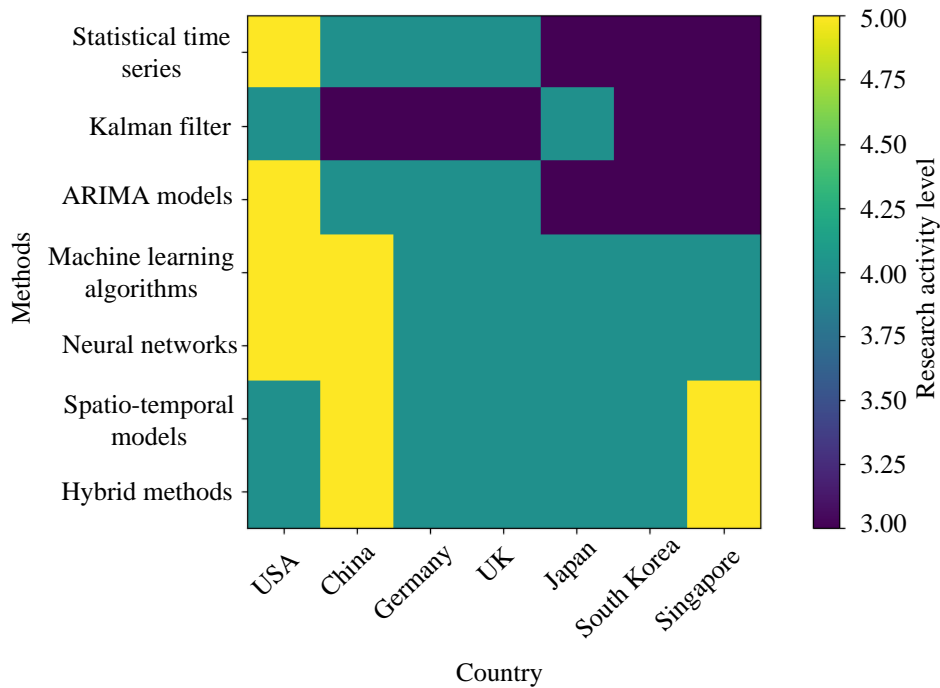


Fig. 3. Distribution of urban transport forecasting methods by Country

In recent decades, transport movement forecasting has increasingly relied on artificial intelligence and machine learning techniques. The application of deep learning models and big data analytics enables real-time processing of heterogeneous data sources and incorporation of complex influencing factors, such as weather conditions, traffic congestion, and dynamic passenger demand. As a result, modern forecasting systems demonstrate significantly improved accuracy and adaptability. Furthermore, the emergence of hybrid and spatio-temporal models has enhanced the ability to capture both temporal dynamics and spatial dependencies within urban transport networks [3,8,9,19]. These advancements contribute to more efficient transport planning and improve accessibility and reliability of urban mobility systems (Fig. 4). The given chronology illustrates the periods of application of forecasting methods in transportation research.

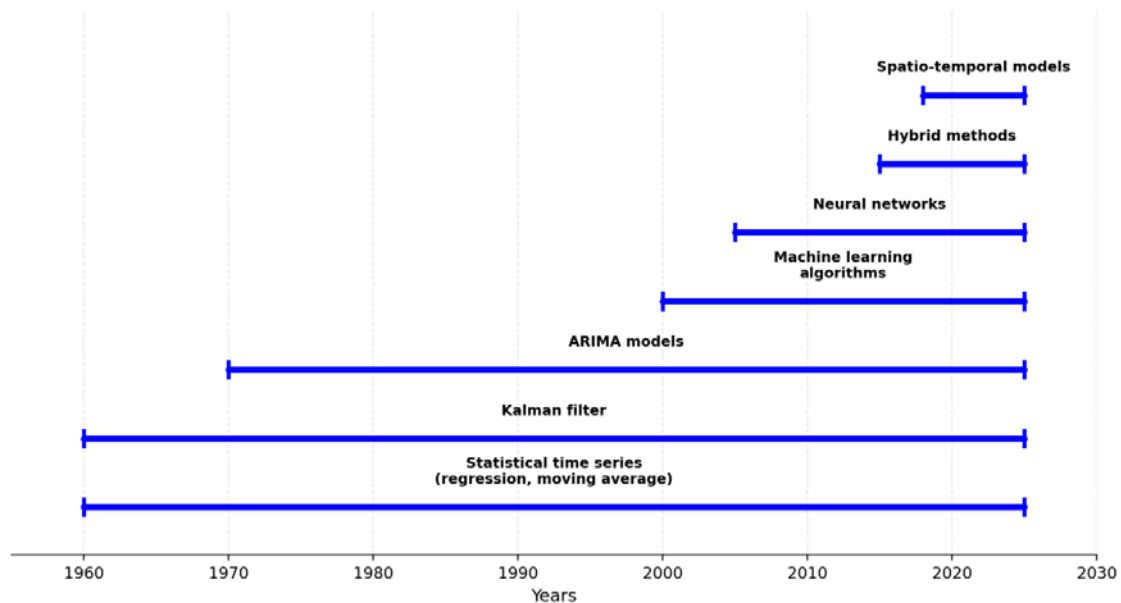


Fig. 4. Timeline of the evolution of forecasting methods for urban public transport movement

Table 1 presents a comparative analysis of the main forecasting methods used in urban public transport systems. It highlights their key characteristics, including accuracy, computational complexity, data requirements, as well as their advantages and limitations.

Table 1.

Comparative Analysis of Forecasting Methods for Urban Public Transport Movement

Forecasting Method	Model Type	Prediction Accuracy	Computational Complexity	Data Type	Main Advantages	Main Disadvantages
Time-Series Methods (ARIMA / SARIMA)	Statistical time-series model	Medium (high for stable data)	Low	Historical time series	Simple implementation, strong mathematical interpretability	Lower accuracy, limited ability to capture nonlinear relationships and external factors
Kalman Filter	Stochastic model	Medium – high	Medium	Streaming data, GPS, sensor data	Effective for real-time forecasting, robust to noise	Requires precise model parameter tuning
Machine learning algorithms, Neural networks	Machine learning / deep learning	High	High	Large datasets (GPS, passenger flow, weather, traffic)	Captures complex nonlinear relationships, high accuracy	Requires large datasets and significant computational resources
Hybrid Models (ARIMA + NN)	Combined model	Very high	High	Combined datasets	Combines strengths of statistical and ML methods	High implementation and tuning complexity

The analysis shows that traditional statistical methods remain useful due to their simplicity and interpretability but are limited in handling complex and nonlinear patterns. In contrast, machine learning and neural network approaches provide higher accuracy at the cost of increased computational requirements and data dependency. Hybrid models demonstrate the best overall performance by combining the strengths of different approaches, although they require more sophisticated implementation and tuning. Overall, the choice of method depends on the availability of data, computational resources, and the required level of prediction accuracy.

DISCUSSION OF THE RESULTS OF THE STUDY AND SUMMARY

The conducted analysis confirms that forecasting urban public transport movement is a multidimensional task that requires the integration of heterogeneous data sources and the application of methods with different levels of mathematical complexity. No single forecasting method can be considered universally optimal for all transport systems, since forecasting performance depends on network structure, service variability, data quality, and the influence of external factors such as weather, incidents, and fluctuations in passenger demand.

Traditional statistical time-series methods preserve their practical relevance because they are relatively simple to implement, computationally efficient, and mathematically interpretable. At the same time, their predictive capability is limited in highly nonlinear and unstable environments. Filtering methods, especially the Kalman filter, are effective for real-time estimation and short-horizon prediction, particularly when continuous streams of GPS, AVL, and sensor data are available. These methods are especially valuable for operational monitoring and control of transport systems.

Machine learning, deep learning, and spatio-temporal approaches currently represent the most promising class of methods for advanced forecasting tasks. Their main advantage lies in the ability to model nonlinear relationships, integrate multiple influencing variables, and capture both temporal dynamics and spatial interactions within transport networks. Hybrid approaches further enhance this potential by combining the interpretability of statistical methods with the flexibility and predictive power of neural and data-driven models. As a result, such models achieve the highest accuracy in complex urban conditions.

The practical use of the obtained results may involve the development of intelligent decision-support systems for public transport operators, real-time passenger information platforms, adaptive timetable optimization tools, and smart city mobility services. Further research should focus on the creation of

scalable forecasting platforms based on big data integration, explainable artificial intelligence, and self-learning adaptive models capable of responding to structural changes in transport behavior. Special attention should also be paid to the transferability of forecasting models across cities with different infrastructural, demographic, and operational characteristics.

REFERENCES

1. Gkiotsalitis K., Cats O. (2021). Public transport planning adaption under the COVID-19 pandemic crisis: literature review of research needs and directions, *Transport Reviews*, 41:3, 374-392, <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1857886>
2. Van Lint, J. W. C., Hoogendoorn, S. P., & Van Zuylen, H. J. (2005). Accurate freeway travel time prediction with state-space neural networks under missing data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Volume 13, Issues 5–6, October–December 2005, Pages 347-369, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2005.03.001>
3. Nuzzolo, A., Crisalli, U., & Comi, A. (2015). An aggregate transport demand model for import and export flow simulation. *Transport*, 30(1), 43–54. <https://doi.org/10.3846/16484142.2013.820215>
4. Cats., O. (2019) Determinants of bus riding time deviations: Relationship between driving patterns and transit performance. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems* 145(1), <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000201>
5. Eleni I. Vlahogianni, Matthew G. Karlaftis, John C. Golias (2014). Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 43, Part 1, Pages 3-19, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.005>
6. Z. Liu, Z. Li, K. Wu and M. Li (2018) Urban Traffic Prediction from Mobility Data Using Deep Learning," in *IEEE Network*, vol. 32, no. 4, pp. 40-46, <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700411>
7. Chen, Z., Lu, Z., Zhong, H., Zhang, Y., & Xue, J. (2022). A spatial-temporal short-term traffic flow prediction model based on graph convolution networks <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.04762>
8. Comi, A., Nuzzolo, A., Brinchi, S., Verghini, R. (2017) Bus travel time variability: some experimental evidences. *Transportation Research Procedia*, vol. 27, pp. 101–108 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.072>
9. Comi, A., Polimeni, A. (2020) Bus Travel Time: Experimental Evidence and Forecasting. *Forecasting*, vol. 2, no. 3, pp. 309–322 <https://doi.org/10.3390/forecast2030017>
10. Comi, A., Zhuk, M., Kovalyshyn, V., Hilevych, V. (2020) Investigating bus travel time and predictive models: a time series-based approach. *Transportation Research Procedia*, vol. 45, pp. 692–699 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.109>
11. Nuzzolo, A., Comi, A. (2016) Advanced Public Transport and Intelligent Transport Systems: New Modelling Challenges. *Transportmetrica A: Transport Science*, vol. 12, no. 8, pp. 674–699 <https://doi.org/10.1080/23249935.2016.1166158>
12. Janicka, L., & Christofa, E. (2019). A data-driven approach for short-term bus travel time prediction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(8), 574–585 <https://doi.org/10.1109/SMC53654.2022.9945254>
13. Williams, B. M., & Hoel, L. A. (2003). Modeling and Forecasting Vehicular Traffic Flow as a Seasonal ARIMA Process: Theoretical Basis and Empirical Results. *Journal of Transportation Engineering*, 129(6), 664–672 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:6\(664\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:6(664))
14. Seo, T., Kusakabe, T., & Asakura, Y. (2017). Estimation of flow and density using probe vehicles with spacing measurement equipment. *Transportation Research Part C*. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.01.033>
15. Work, D. B., Tossavainen, O. P., Blandin, S., Bayen, A. M., Iwuchukwu, T., & Tracton, K. (2019). An ensemble Kalman filtering approach to highway traffic estimation. *Transportation Research Part C*. <https://doi.org/10.1109/CDC.2008.4739016>
16. Ma, X., Tao, Z., Wang, Y., Yu, H., & Wang, Y. (2015). Long short-term memory neural network for traffic speed prediction using remote microwave sensor data. *Transportation Research Part C*, 54, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.014>
17. Polson, N. G., & Sokolov, V. O. (2017). Deep learning for short-term traffic flow prediction. *Transportation Research Part C*, 79, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.024>
18. Zhang, J., Zheng, Y., & Qi, D. (2017). Deep spatio-temporal residual networks for citywide crowd flows prediction. *Proceedings of AAAI Conference on Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.1609/aaai.v31i1.10735>
19. Zhang, G. P. (2018). Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*, 50, 159–175. [https://doi.org/10.1016/S0925-2312\(01\)00702-0](https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00702-0)

20. Zhang, X., Lauber, L., Liu, H., Shi, J., Xie, M., Pan, Y. (2022) Travel time prediction of urban public transportation based on detection of single routes. PLoS ONE, vol. 17, no. 1, e0262535. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262535>
21. Nuzzolo, A., Comi, A. (2021) Dynamic Optimal Travel Strategies in Intelligent Stochastic Transit Networks. Information, vol. 12, no. 7, 281. <https://doi.org/10.3390/info12070281>
22. Chen, C., Liu, Y., & Lv, Y. (2021). Deep learning approaches for traffic flow prediction: A survey. IEEE T-ITS. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-66048/v1>
23. Y. Lv, Y. Duan, W. Kang, Z. Li and F. -Y. Wang (2015). Traffic Flow Prediction With Big Data: A Deep Learning Approach, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 16, no. 2, pp. 865-873, <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2345663> .
24. Wang, J., Deng, W., & Guo, Y. (2019). A Bayesian combination model for short-term traffic flow forecasting. Transportation Research Part C. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102721>
25. Z. Wang, J. Hu, G. Min, Z. Zhao, Z. Chang and Z. Wang (2023). Spatial-Temporal Cellular Traffic Prediction for 5G and Beyond: A Graph Neural Networks-Based Approach, in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 19, no. 4, pp. 5722-5731, <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3182768>
26. Suwardo, Madzlan, N., Ibrahim, K. (2010) ARIMA models for bus travel time prediction. The Journal of the Institution of Engineers, Malaysia, vol. 71, no. 2, pp. 49–58.
27. Jairam, R., Kumar, B. A., Arkatkar, S. S., Vanajakshi, L. (2018). Performance Comparison of Bus Travel Time Prediction Models across Indian Cities. Transportation Research Record, 2018, vol. 2672, no. 31, pp. 87–98. <https://doi.org/10.1177/0361198118770175>
28. Rashvand, N., Ahn, C. R., Azar, E. R., Hasan, S. (2024). Real-Time Bus Arrival Prediction: A Deep Learning Approach for Enhanced Urban Mobility. arXiv preprint, 2024, arXiv:2303.15495v3. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.15495>
29. Baghbani, A., Bouguila, N., Patterson, Z. (2023) Short-Term Passenger Flow Prediction Using a Bus Network Graph Convolutional Long Short-Term Memory Neural Network Model. Transportation Research Record, vol. 2677, no. 2, pp. 530–547. <https://doi.org/10.1177/03611981221112673>
30. Duan, Y., Lv, Y., & Wang, F. (2020). Travel time prediction with LSTM neural networks. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795686>
31. Seo, T., Kusakabe, T., & Asakura, Y. (2017). Traffic state estimation using probe vehicles. Transportation Research Part C. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.012>
32. Work, D. B., et al. (2019). Traffic estimation using Kalman filtering approaches. Transportation Research Part C. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.007>

Дата надходження статті до видання: 30.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

В.М. Мартишко¹[0000-0002-9846-7455], Ю.О. Гуменюк¹[0000-0003-2463-1950], О.П. Деркач¹[0000-0002-6881-3521],
Г.А.Герасимчук²[0000-0002-1348-4927]

Національний університет біоресурсів та природокористування України¹
Луцький національний технічний університет²

МЕХАНІЗАЦІЯ І АВТОМАТИЗАЦІЯ САДІВНИЦТВА: ШЛЯХ ДО СТАЛОГО ТА ЕФЕКТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Питання механізації та автоматизації є надзвичайно актуальними в контексті впровадження інноваційних технологій у садівництві. Застосування сучасних рішень спрямоване на досягнення максимальної врожайності, високої якості плодів та значного зниження витрат ручної праці. Використання спеціалізованих машин та автоматизованих систем дозволяє оптимізувати технологічні ресурси, мінімізувати вплив людини на навколишнє середовище та зменшити ризики для здоров'я працівників. Сучасні машини для догляду за лісосмугами мають модульну конструкцію, що дозволяє адаптувати робочі органи до конкретних умов. Для захисту стовбурів дерев агрегати оснащені електрогідролічним механізмом відхилення, а активні компоненти живляться від гідравлічної системи трактора або автономного силового агрегату. Виробники пропонують моделі з переднім, заднім або середнім навісним обладнанням. Вітчизняні виробники вже активно впроваджують ці світові стандарти у власному виробництві. Результати досліджень підтверджують світову тенденцію переходу від традиційних методів механізації до інноваційних систем, заснованих на принципах автоматизації. Більшість процесів у садах зараз автоматизовані: самохідні шасі з автопілотом працюють автономно, а системи зрошення керуються дистанційно. Сільськогосподарські дрони використовуються для захисту рослин, а збір врожаю здійснюється за допомогою інтелектуально керованих комбайнів. Важливим кроком до впровадження сільськогосподарських дронів у садівництві буде можливість їх інтеграції в ширші системи автоматизації та покращення прийняття рішень, такі як метеостанції та системи зрошення та фертигації. Ключовими елементами цього процесу є моніторинг та IoT-рішення на основі датчиків вологості ґрунту та систем сканування крони. Технології диференційованого внесення добрив та засобів захисту рослин впроваджуються з урахуванням мінливості насаджень, тоді як глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS/GPS) забезпечують автономне пілотування обладнання між рядами. Автори узагальнюють світові тенденції механізації садівничої галузі та обґрунтовують пріоритетні напрямки використання автоматизованих систем у садівництві. Дослідження показало, що садівництво перебуває на ранніх стадіях трансформації, зумовленої поступовим переходом від механізованих до автоматизованих технологій. Це сприяє підвищенню ефективності виробництва та сталому розвитку галузі.

Ключові слова: садівнича галузь, механізація, автоматизація, роботизація, перспективи розвитку.

V.M. Martyshko, Yu.O. Gumenyuk, O.P. Derkach, H.A. Herasymchuk

MECHANIZATION AND AUTOMATION OF HORTICULTURE: THE PATH TO SUSTAINABLE AND EFFICIENT PRODUCTION

The issues of mechanization and automation are highly relevant in the context of introducing innovative technologies in horticulture. The application of modern solutions is aimed at achieving maximum yields, high-quality fruit, and a significant reduction in manual labor costs. The use of specialized machines and automated systems allows for the optimization of technological resources, minimization of human impact on the environment, and reduction of health risks for workers. Modern machines for maintaining tree-line strips feature a modular design, allowing working components to be adapted to specific conditions. To protect tree trunks, the units are equipped with an electro-hydraulic deflection mechanism, and the active components are powered by the tractor's hydraulic system or an autonomous power unit. Manufacturers offer models with front, rear, or mid-mount hitches. Domestic manufacturers are already actively implementing these global standards in their own production. Research results confirm the global trend of transitioning from traditional mechanization methods to innovative systems based on automation principles. Most orchard processes are now automated: self-propelled chassis with autopilot operate autonomously, and irrigation systems are controlled remotely. Agricultural drones are used for plant protection, and harvesting is carried out by intelligently controlled combines. An important step toward the adoption of agricultural drones in horticulture will be the ability to integrate them into broader automation systems and improve decision-making, such as weather stations and irrigation and fertigation systems. Key elements of this process include monitoring and IoT solutions based on soil moisture sensors and canopy scanning systems. Technologies for the differentiated application of fertilizers and plant protection products are implemented taking into account the variability of plantings, while global navigation satellite systems (GNSS/GPS) ensure autonomous piloting of equipment between rows. The authors summarize global trends in the mechanization of the horticulture industry and justify priority areas for the use of automated systems in horticulture. The study found that horticulture is in the early stages of a transformation driven by a gradual shift from mechanized to automated technologies. This contributes to increased production efficiency and the sustainable development of the industry.

Keywords: horticulture industry, mechanization, automation, robotization, development prospects.

Стан питання та постановка проблеми. Садівництво – це стратегічна галузь, що посідає ключове місце в агропромисловому комплексі України. За останнє десятиліття вітчизняний сектор садівництва продемонстрував суттєвий прогрес, забезпечуючи внутрішні потреби країни і стати стабільним експортера фруктової продукції на ринки ЄС [9]. Розвиток галузі неможливий без

© В.М. Мартишко, Ю.О. Гуменюк, О.П. Деркач, Г.А. Герасимчук

впровадження передових технологій та інноваційних методів. Одним із визначальних чинників трансформації садівництва є механізація та автоматизація технологічних процесів, які сприяють нарощуванню обсягів виробництва, повному задоволенню попиту на плодово-ягідну продукцію на внутрішньому ринку та розширенню експортного потенціалу [8].

Висока частка ручної праці, постійне зростання її вартості, а також гострий сезонний дефіцит кадрів актуалізують потребу в інноваційних підходах. Перехід від ручної праці до високотехнологічних рішень є не просто ознакою прогресу, а об'єктивною необхідністю, зумовленою браком робочої сили та жорсткими вимогами екологічної безпеки. У цьому контексті все більшої актуальності набуває впровадження автоматизованих та роботизованих систем, що відповідають викликам сучасності.

Питанням механізації та автоматизації процесів у садівництві присвячено праці низки провідних вітчизняних учених. Зокрема, технологічні та технічні аспекти механізації галузі висвітлено в дослідженнях [10, 11, 12]. Проблематика автоматизації та роботизації виробничих процесів знайшла відображення в роботах [13, 14, 15].

Попри наявні напрацювання, у вітчизняній науковій літературі залишаються недостатньо розкритими – як у теоретичному, так і в прикладному аспектах – питання інтенсифікації садівництва, передусім у контексті адаптації галузі до сучасних умов господарювання. Водночас сучасні зарубіжні публікації, зокрема праці [25, 26] широко висвітлюють поступове запровадження в садівництві інтелектуальних систем керування та роботизованих комплексів.

Особлива увага в дослідженнях авторів [31, 28] приділяється застосуванню агродронів при збиранні плодів, зрошенню садів, моніторингу та обприскування насаджень, що є ключовим чинником цифрової трансформації сучасного садівництва.

Впровадження інноваційних систем у практику сучасного садівництва відбувається одночасно з моніторингом поточного стану технічного забезпечення і комплексного аналізу роботизованих комплексів для наскрізної автоматизації технологій вирощування плодкових культур. До базових технологій цього напрямку належить застосування автономних мобільних платформ, здатних виконувати широкий спектр операцій: від садіння та зрошення до прецизійного захисту рослин і збирання врожаю з мінімальними пошкодженнями.

На відміну від рослинництва, садівництво потребує вузькоспеціалізованих технічних рішень. Це зумовлено специфікою агрофізичних параметрів насаджень: обмеженими міжряддями, різноманітністю структури крон дерев, а також підвищеними вимогами до збереження цілісності плодів під час механічного впливу.

Протягом останнього десятиліття в аграрному секторі України відбувся значний прогрес у сферах автоматизації та роботизації на засадах впровадження концепції точного землеробства. Цифрові інструменти – зокрема штучний інтелект (ШІ), Інтернет речей (IoT) та хмарні системи підтримки прийняття рішень – сприяють розробці та впровадженню дедалі складніших і високопродуктивних машин. Позитивний досвід трансформацій у суміжних галузях агропромислового комплексу створює передумови для активного застосування в садівництві сталих агротехнологій [16].

Зазначене актуалізує розробку науково обґрунтованих підходів до впровадження інновацій, що враховують специфіку галузі та стратегію розвитку цифровізації садівництва.

Мета дослідження – узагальнити світові тенденції механізації галузі та обґрунтувати напрямки використання автоматизованих систем у садівництві.

Матеріали та методи. У процесі дослідження використано комплекс наукових методів, зокрема: абстрактно-логічний – для узагальнення теоретичних і методичних засад; монографічний – при опрацюванні емпіричної бази. Джерельну основу дослідження склали матеріали наукових конференцій, спеціалізована література та актуальні відкриті дані мережі Інтернет.

Результати дослідження та обговорення. Рівень механізації садівництва в Україні не відповідає вимогам сучасних технологій. Ми маємо високі показники при обробі ґрунту (в тому числі при догляді за насадженнями) – 90...95 %, хімічному захисті – 90 %, де можна адаптувати техніку загального призначення, і критично низькі при догляді за кроною – 25% і збиранні врожаю – 10 % [3].

В інтенсивних садах шпалерного типу рівень механізації вищий, проте автоматизація (використання систем без участі людини) впроваджується повільно через високу вартість впровадження. Окремі систем автоматизації (наприклад, роботи-збирачі) все ще знаходяться на стадії прототипів або тестування навіть у країнах ЄС та США [24].

Окремі господарства уже використовують високо механізовані системи з елементами автоматизації. Інтегровані датчики оптимізують обробіток ґрунту, полив та живлення рослин, що заощаджує ресурси і зменшує екологічне навантаження. Проте галузь потребує масштабування цифрових рішень.

В Україні питаннями механізації та автоматизації садівництва займаються профільні наукові установи, а також вітчизняні компанії-виробники спеціалізованої техніки. До провідних підприємств галузі належать: ПП «Агрореммаш-Плюс» (м. Кропивницький) – розробляє та виготовляє техніку для обрізування, обприскування, а також мульчування садів і виноградників; АТ «Ельворті» (м. Кропивницький) та ТОВ «Промінь» (м. Біла Церква) – спеціалізуються на виробництві сучасних ґрунтообробних машин; ТОВ «Львівсільмаш» – зосереджує діяльність на випуску високо ефективних садових обприскувачів.

На сьогодні в Україні власне серійне виробництво спеціалізованих садових тракторів відсутнє. Малі фермерські господарства переважно використовують універсальні китайські міні-трактори: вони приваблюють доступною ціною та компактністю, проте не є вузькоспеціалізованими машинами для професійного садівництва. Натомість великі агропідприємства віддають перевагу тракторам провідних світових брендів, обираючи моделі, що спеціально адаптовані для складних умов у садах і виноградниках. Лідерами на ринку спеціалізованих тракторів є такі серії: CLAAS NEXOS (Німеччина); Massey Ferguson (серія 3, США); New Holland (серія T4, США/Італія); Landini (серія Rex, Італія). Ці машини поєднують у собі, специфічні габарити та сучасні системи для ефективної роботи в садах і виноградниках.

Садовий трактор відрізняється від моделей загального призначення. Обмежений простір для маневрування диктує специфічні вимоги до габаритів: компактність дозволяє техніці працювати в міжряддях, не травмуючи гілки та плоди.

Конструкція таких тракторів оптимізована для роботи в обмеженому просторі: вони мають коротку колісну базу, мінімальну ширину колії та низьку габаритну висоту. Це зумовлює використання коліс невеликого діаметра та компактної кабіни.

У садівництві, де ширина міжрядь у середньому становить 3 м, використовують стандартні вузькоколісні моделі. У виноградарстві, де міжряддя можуть бути меншими за 1,5 м, застосовують спеціалізовані модифікації завширшки трохи більше ніж 1 м. Обмеження по висоті зазвичай складає 2,3–2,4 м, що дозволяє техніці вільно проходити під кронами дерев та виноградними шпалерами.

Окремі моделі оснащуються кріслом та кермом, що повертаються на 180°. Це дозволяє оператору ефективно працювати в режимі «задом-наперед», забезпечуючи зручний огляд начіпного обладнання. Для роботи з пестицидами трактор обов'язково обладнується герметичною кабіною з системою фільтрації повітря (категорії 4), що захищає від хімічних парів та аерозолів.

З огляду на різноманітність сучасного обладнання, трактор повинен мати універсальну задню начіпку. Для максимальної продуктивності бажана наявність передньої начіпки та переднього ВВП – це дозволяє використовувати комбіновані агрегати та виконувати кілька операцій за один прохід. Для стабільної роботи приводних знарядь необхідна висока продуктивність гідравліки (насос від 60 л/хв) та обов'язкова наявність системи охолодження оливи.

Трактори фірма *CLAAS* серії *NEXOS* випускає в 4^х варіантах: F, FB1, VL і VE, з мінімальною загальною шириною 1,46; 1,40; 1,26 і 1,00 м. Трактори оснащені двигунами потужністю від 65 до 106 к.с. Механічна трансмісія (16/16) та електрогідравлічне керування дозволяють маневрувати з радіусом розвороту від 3,06 м [21].

New Holland T4 та Massey Ferguson (серія 3) мають аналогічні конструктивні параметри та в обов'язковому порядку оснащуються системами фільтрації кабіни для захисту оператора під час хімічного обприскування насаджень.

Перспективними напрямками розвитку галузі є впровадження електротракторів та гібридних силових установок, що поєднують екологічність із високою ефективністю. Дослідження підтверджують, що електродвигуни на 30 – 40 % ефективніші за дизельні аналоги [7]. Прикладом такої інновації є італійський трактор Landini Rex4 Full-Hybrid, оснащений комбінованим електродвигуном-генератором з номінальною потужністю 50 кВт. У суто електричному режимі ця модель здатна працювати до 2 годин без підзарядки. Паралельно зростає роль автономних машин: завдяки GPS-навігації, сенсорам та штучному інтелекту вони функціонують без участі оператора, що мінімізує вплив людського фактора та гарантує високу точність обробітки садів.

До найбільш поширених механізованих та частково автоматизованих технологічних процесів в садівництві відносяться: обробіток ґрунту – де використовують дискові борони, культиватори, фрези косарки та мульчувачі з автоматичними пристроями керування; хімічний захист – в основному, вентиляторні обприскувачі; догляд за кроною – автоматизовані контурні обрізувачі дерев і кущів; збирання врожаю – спеціалізовані комбайни і плодозбирні платформи; зрошення (автоматичний полив) – системи краплинного або спринклерного поливу з автоматичними клапанами, які керуються таймерами, датчиками вологості або погодними даними.

Ключовою перевагою новітньої техніки є її модульна (секційна) конструкція. Вона дозволяє оперативно адаптувати агрегат до конкретних агротехнічних умов шляхом швидкої заміни робочих органів. Провідні світові виробники пропонують широку лінійку такого обладнання для комплексного вирішення завдань догляду за садами.

Найширший асортимент садових машин виробляють італійські компанії: SICMA S.p.A., Calderoni, GEO, Ideal S.r.l., Irrimec S.r.l. та N.Blosi. Значну нішу на ринку займають іспанська компанія ID David, данська Hardi, а також польські виробники Ślęza та Weremczuk FMR, які спеціалізуються на техніці для ягідників і захисту рослин. У сегменті цифрових технологій провідну роль відіграє китайська компанія XAG – світовий лідер у виробництві безпілотних систем, зокрема агродронів та автономних наземних роботів.

Для догляду за ґрунтом зразком універсальної модульної техніки є культиватор PRO-2 (рис.1) від SICMA S.p.A. (Італія). Він призначений для обробітку ґрунту в ягідниках, виноградниках та інтенсивних садах із міжряддями 1,75–3,8 м [29].



Рис. 1. Культиватор SICMA PRO-2

Залежно від обраної технології утримання ґрунту, агрегат може комплектуватися різними змінними модулями: поворотними лапами для підрізання та вичісування бур'янів; секціями з горизонтальними ножами або вертикальними фрезами, а також поворотним тримером для скошування трави.

Для зрошення садів використовують машини та системи як вітчизняного, так і іноземного виробництва, в основі яких інновації технологічні рішення, що забезпечують мінімізацію негативного впливу ерозії ґрунту та втрат води.

Краплинне зрошення вважається найефективнішим методом поливу для садів завдяки точній подачі води безпосередньо до кореневої системи. Це забезпечує понад 90–95% ефективності використання ресурсів. Споживання води зменшується на 30–50% порівняно з традиційним дощуванням [17]. Вода подається малими порціями, що мінімізує випаровування та стікання. Рослини отримують вологу рівномірно, що сприяє глибокому розвитку коренів. Система дозволяє автоматизувати процес, заощаджуючи час та витрати на оплату праці. У виробництві обладнання для систем крапельного поливу компанія «Іррігатор Україна», що є дочірнім підприємством ізраїльської корпорації Metzer, є одним зі світових лідерів поливу [6].

Для зрошення розсадників і ягідників частіше використовують дощувальні машини барабанного типу з імпульсними спринклерами, що імітують природний дощ. Перевагами таких машин є мобільність і маневреність, що дозволяє оперативно переміщувати установку між окремими кварталами або секторами саду залежно від потреби у волозі. Барабанні машини здатні зрошувати кути та краї ділянок, досягаючи майже 100% покриття площі. Зразком таких систем є зрошувачі італійського виробництва компанії IRRIME [5].

Сучасні сади все частіше переходять на автоматизоване керування, що мінімізує людський фактор та оптимізує ресурси. Це не лише економія води, а й необхідний мікроклімат для рослин.

Особливе місце посідають «розумні» системи з можливістю дистанційного керування, адаптуючись до довкілля завдяки технічному оснащенню: датчики вологості, вимірюють стан ґрунту в реальному часі й активують полив тільки за потреби; метеостанції, аналізують прогноз погоди та автоматично скасовують сеанс під час дощу чи сильного вітру; мобільні додатки, дають змогу налаштовувати графіки та отримувати звіти про роботу системи з будь-якої точки світу [28].

Для хімічного захисту садів та ягідників вентиляторні обприскувачі залишаються базовим рішенням, їхня головна перевага – здатність створювати потужний повітряний потік, який забезпечує глибоке проникнення робочого розчину навіть у густу крону дерев. Завдяки робочому тиску до 10 бар досягається дрібнодисперсне розпилення, що гарантує рівномірне покриття всієї листової поверхні.

На ринку України представлена техніка як світових лідерів: IDEAL (Італія), Viscar (Німеччина), VAB Vamps NV (Бельгія), так і перевірених вітчизняних, зокрема ТОВ «Львівсільмаш». Використання європейських комплектуючих (насосів) у вітчизняних машинах дозволяє поєднати доступну вартість агрегату з високою якістю захисту рослин [20].

Для хімічного захисту пальметних садів застосовують тунельні обприскувачі. Конструкція таких машин складається з опорної рами, однієї або кількох закритих камер та системи рециркуляції робочого розчину. Завдяки закритому типу камер пестициди не потрапляють за межі зони обробки, оскільки рослини під час обприскування перебувають безпосередньо всередині тунелю [22].

Кожна камера обладнана вертикальними сталевими колекторами, розміщеними на протилежних стінках. На них встановлено від 5 до 10 форсунок, які розпилюють рідину, утворюючи дрібнодисперсний туман. Це гарантує рівномірне та якісне покриття листя і плодів.

Головною особливістю тунельних обприскувачів є система повторного використання розчину. Рідина, що не осіла на рослинах, збирається і повертається назад у бак. Ефективність рециркуляції залежить від фази вегетації: навесні, коли листя ще мало, відсоток повернення розчину до 70%; у літній період цей показник знижується до 20%. Переваги тунельних обприскувачів – можливість роботи у вітряну погоду та при прямому сонячному світлі, економія пестицидів на 50 – 70% та мінімальний вплив на довкілля.

На практиці господарства переходять від простих вентиляторних обприскувачів на користь систем з ISOBUS-сумісністю, які дозволяють керувати всіма функціями машини через стандартний (єдиний) термінал трактора.

Використання *GPS-навігації* у поєднанні з системами супутникового моніторингу дозволяє дистанційно керувати процесом застосування пестицидів на основі точних технологічних показників з використанням самохідних роботів або агродронів. Завдяки дисплею бортового комп'ютера оператор в режимі реального часу може контролювати ключові параметри: робочий тиск у системі, поточну та загальну витрату робочої рідини, робочу швидкість агрегату, оброблену площу та час роботи.

Особливо ефективним є застосування агродронів (рис.2) та автономних тракторів для точкового внесення пестицидів, що дозволяє точно визначати маршрут руху агрегатів і вносити пестициди виключно в тих зонах, де вони необхідні, мінімізувати їх вплив на довкілля та ризики для здоров'я людей [1].

На відміну від польових культур у садівництві, попит на агродрони-обприскувачі лише починає формуватися. Це зумовлено тим, що традиційні підходи в садівництві змінюються повільніше, ніж у рослинництві, а методи захисту багаторічних насаджень суттєво відрізняються від обробки польових культур.

Додаток до XAG має функцію автоматичного планування маршруту, залежно від форми та розміру саду, виявляє на віддалі до 80 метрів і обминає перешкоди. Однією з ключових переваг агродрона-обприскувача є його здатність здійснювати обліт саду з метою створення робочої карти [23].

Використання безпілотних рішень порівняно з традиційною технікою дозволяє до 90% економії пального та до 30% – пестицидів, оперативно виявляти осередки поширення шкідників і хвороб. За прогнозами фахівців, до 2028 року частка використання агродронів для внесення ЗЗР в українському садівництві сягне 20–25%, що стане значним успіхом.

Догляд за кроною – одна з найтрудомісткіших операцій у садівництві. Для детального обрізування використовують ручні, пневматичні або акумуляторні інструменти: ножівки, секатори та сучкорізи. Порівняно з пневматичними моделями, що потребують компресора, акумуляторні інструменти є значно зручнішими у використанні.



Рис. 2. Агродрон-обприскувач XAG P100 PRO

Для детального обрізування крон плодових дерев застосовують садові платформи, що забезпечують стабільний доступ до верхнього ярусу (на висоті 3,5 – 5,0 м) та створюють безпечні й комфортні умови праці. На українському ринку представлені причіпні моделі вітчизняного виробництва від ГК «Брацлав» і ТОВ «Агроташ-Калина», а також продукція фірми Agromasina S.A. (Молдова). Найбільш досконалою вважається універсальна самохідна італійська платформа Zip 30 фірми Blosi (рис. 3, а).

Використання такої техніки в поєднанні з пневматичним або акумуляторним інструментом дозволяє підвищити продуктивність у 1,5–2 рази та скоротити трудовитрати на 25–40%. Окрім економічного ефекту, робота із використанням платформи гарантує стабільну якість зрізу на всій висоті дерева та мінімізує зайві переміщення працівників у міжряддях [27].



Рис. 3. Самохідні садові платформи Zip 30 фірми Blosi: а) – для детального обрізування крон плодових дерев; б) – для збиранні плодів

Контурне обрізування – це дієвий спосіб мінімізувати ручну працю та пришвидшити догляд за садом. Найчастіше для цього використовують дискові обрізувачі з гідравлічним приводом. Це універсальне націпне обладнання, що сумісне з тракторами чи телескопічними навантажувачами. На українському ринку популярною моделлю такого типу є садовий обрізувач ОСК–9 від ТОВ «СИНТЕЗ АГРО».

Проте дискові системи мають недолік: вони часто не дорізають тонкі гілки, відхиляючи їх замість чистого зрізу, що пошкоджує кору. Для уникнення цієї проблеми, краще обирати машини зі зворотно-поступальним рухом ножів (принцип сегментно-пальцевої косарки). Прикладом такої техніки є італійський обрізувач FAMA SKR 250, який працює з гілками діаметром до 3 см («FAMA – fabbrica macchine»).

Оптимальною стратегією сьогодні є комбінована схема обрізування: контурний обрізувач виконує близько 80% робіт, формуючи верхню та бічні площини, а працівники з акумуляторними секаторами лише завершують процес, проріджуючи внутрішню частину крони. Такий підхід скорочує витрати часу на 50–70% порівняно з ручною роботою.

У перспективі інтенсивні сади проектуватимуть як «плодові стіни», адаптовані під повну автоматизацію. Це дозволить впровадити системи машинного зору, які скануватимуть дерево в реальному часі, поки штучний інтелект миттєво прийматиме рішення щодо зрізу кожної окремої гілки.

Збирання плодів – це ключовий етап у садівництві, оскільки частка витрат на цей процес становить від 15% до 40% у загальній структурі собівартості вирощування. Ефективність збирання врожаю забезпечується використанням спеціальних машин, які підбирають відповідно до біологічних особливостей культури і схем вирощування.

Застосування плодозбиральних платформ є загальноприйнятим технологічним стандартом у сучасних інтенсивних насадженнях зерняткових культур, що забезпечує високу якість плодів для реалізації у свіжому вигляді. Вони полегшують ручну працю, дозволяючи зручне переміщення збирачів на висоту, знімати плоди на різній висоті, та автоматично транспортувати плоди в контейнери, мінімізуючи механічні пошкодження.

Самохідна платформа Zip 30 фірми Blosi (рис. 3, б) дозволяє збирати плоди вручну на висоті до 4 метрів, має автоматичне вирівнювання на схилах, автоматизує логістику при збиранні та наповненні контейнерів. Платформу обслуговує ланка із 6 працівників, що забезпечує продуктивність на рівні 200...250 кг/год кожного. Платформа комплектується причепом для автоматизованого розвантаження контейнерів наповнених плодами [18].

Самохідна напівавтоматична платформа Frumaco Tecnofruit CF 105 (Італія) призначена для збирання плодів у садах із міжряддями від 3,0 до 3,9 м (рис. 4). Конструкція з чотирма бічними платформами дозволяє збирати врожай одночасно на трьох рівнях з кронами дерев заввишки до 3,6 м (рис. 4, а). Процес знімання плодів здійснюється вручну, проте їхнє подальше транспортування та заповнення контейнерів автоматизовано за допомогою спеціалізованих напівавтоматичних транспортерів.

Для роботи з контейнерами (встановлення, переміщення та розвантаження заповнених місткостей) передбачено спеціальний причіп (рис. 4, б). Самохідна платформа Tecnofruit CF 105 розрахована на групу до 6 осіб, а її продуктивність сягає 200–250 кг/год на кожного працівника [19].



Рис. 4. Самохідна садова платформа Frumaco Tecnofruit CF 105: а) – загальний вигляд; б) – процес переміщення і наповнення контейнерів плодами.

Плодозбиральні машини вібраційної дії, які працюють за принципом зупинки біля кожного дерева, актуальні переважно в садах старого типу. Продуктивність таких машин мала через низький коефіцієнт використання робочого часу через маневрування, позиціонування робочих органів щодо штамба та переїзди між деревами. Такі машини є найбільш ефективними для збирання кісточкових культур, плоди яких призначені для подальшої промислової переробки. Для збирання зерняткових плодів їх робота обмежена.

Потокові ягодозбиральні комбайни (для смородини, малини, агрусу) забезпечують високу продуктивність, максимальну повноту знімання врожаю та належний рівень чистоти зібраних ягід. Завдяки безперервному руху вздовж рядів та системам інтенсивного очищення від домішок (листя, гілок), ці машини забезпечують збір продукції як для промислової переробки (замороження, соки), так і для свіжого споживання.

Причіпний ягодозбиральний комбайн KAREN Weremczuk Agromachines (Польща) (рис. 5) призначений для збирання лохини, малини, ожини та жимолості [4].

Комбайн причіпний, оснащений двома вертикальними струшувачами з регульованою частотою струшування (рис. 5, а).

Завдяки цьому повнота збирання ягід досить висока при задовільній якості. Втрати струшених плодів мінімальні завдяки системі герметизації, що складається з кришок та уловлювачів.

У світі стає дедалі актуальнішим впровадження автономних машин і роботів, здатних збирати врожай без участі людини. Завдяки автономній навігації (GPS), штучному інтелекту (AI) та

сучасному апаратному забезпеченню роботи-збирачі самостійно пересуваються міжряддями садів і здійснюють вибіркове збирання плодів».

В університеті Монаша (Австралія) створили робота Apple Harvester для сканування садів і виявлення плодів. Під час роботи він аналізує колір і розмір кожного яблука, а також орієнтацію та розташування гілок. Робот знімає плоди за допомогою м'якого захвату чотирма «пальцями» з вакуумним приводом (рис.6, а). Це забезпечує мінімальне пошкодження врожаю та самого дерева, розпізнавати та збирати понад 90% плодів у радіусі 1,2 м, а на збирання одного яблука система витрачає менше ніж 7 секунд [24].



Рис. 5. Причіпний ягодозбиральний комбайн KAREN: а) – загальний вигляд в роботі; б) – сортування та очищення від сміття в комбайні

Компанія Tevel Aerobotics Technologies (Ізраїль) розробила платформу зі штучним інтелектом для збирання плодів допомогою «присосок» встановлених на штангах (рис.6, в, з). Система збору врожаю складається з 8 Flying Autonomous Robots (літаючі автономні роботи), встановлених на наземній платформі Darwin Harvesting Group (рис.6, б). При збиранні плодів дрони переміщуються серед гілок і вибирають тільки зрілі плоди без ознак пошкоджень. Збір врожаю відбувається без участі людей на всіх етапах [2].

Захоплення яблук дронами здійснюється вакуумною «присоскою» (рис.6, в), що мінімізує пошкодження плодів. Зняті яблука дрони укладають на стрічку платформи, а далі плоди потрапляють у контейнери. За інформацією розробників, літаючі роботи збирають понад 90% яблук в полі зору своєї камери, на відстані до 1,2 м із пошкодження менше ніж 6%.

Дротове живлення від платформи дає можливість літаючим дронам-збирачам працювати до тих пір, поки сама платформа отримує живлення. Якщо платформу заживити силовим кабелем, робота може тривати навіть у темний час доби [24].

Впровадження роботизованих систем збирання плодів в Україні у найближчій перспективі є малоімовірним через низку чинників: неадаптованість схем садіння та формування крон вітчизняних садів технічним вимогам обладнання, дефіцит інвестиційного капіталу та тривалий термін окупності такої техніки.

У перспективі автоматизація та роботизація садівництва ґрунтуватимуться на принципах точного землеробства з урахуванням галузевої специфіки. Ключовими компонентами цього процесу є: комплексний моніторинг та IoT-рішення – використання сенсорів вологості ґрунту, датчиків сканування крони та інших інтелектуальних пристроїв для збору даних у реальному часі; технології диференційованого внесення поживних речовин та засобів захисту рослин, що адаптуються до варіативності насаджень; глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS/GPS) для забезпечення проектування садів, цифрового картографування та автономного пілотування техніки в міжряддях.

Висновок. В результаті дослідження встановлено, що садівництво перебуває на початковому етапі трансформації, зумовленої поступовим переходом від механізованих до автоматизованих технологій. Це сприяє підвищенню ефективності виробництва і сталому розвитку галузі.

З'ясовано, причини недостатнього використання машин і автоматизованих систем, визначено фактори, що гальмують їх впровадження, та шляхи подолання цих перешкод. Визначено основні напрями механізації, автоматизації та модернізації технологій у садівництві.

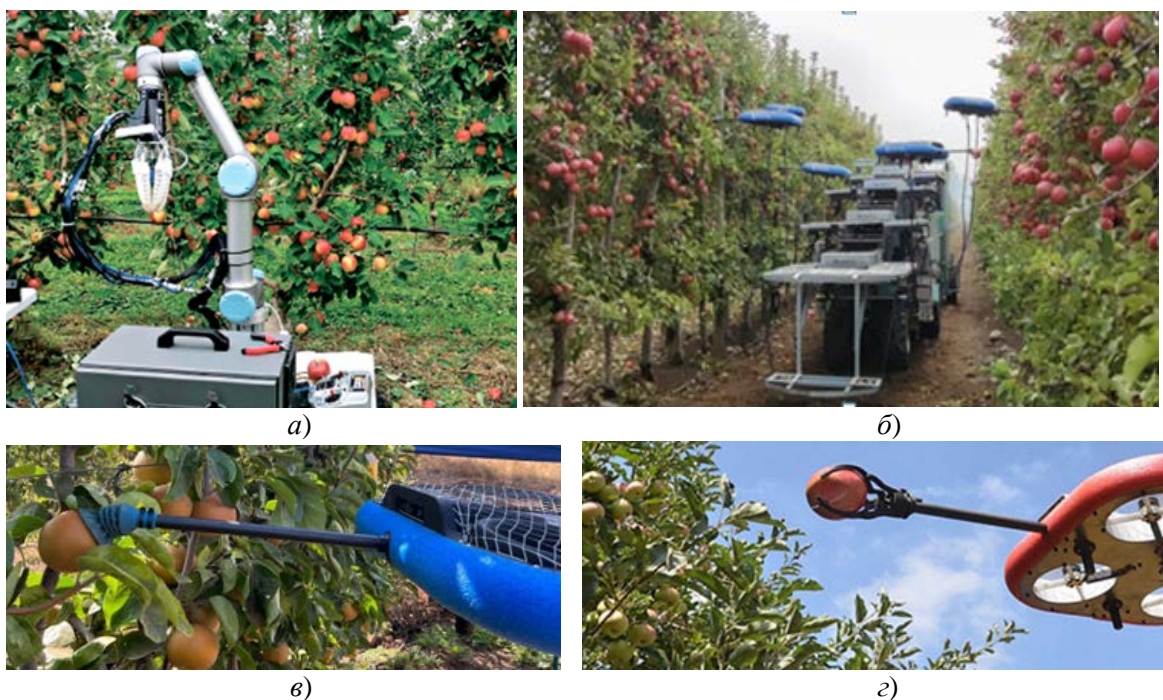


Рис. 6. Роботизовані платформи для збирання плодів: а) – платформа із захватами «пальцями» і пневматичним приводом; б) – платформа з літаючими роботами; в) – захоплення «присосками»; з) – захоплення за принципом роботи кисті руки.

Використання робототехніки та штучного інтелекту підтвердило значний потенціал для підвищення продуктивності та мінімізації втрат у садівництві. Завдяки методам точного землеробства вдалося оптимізувати розподіл ресурсів (води, добрив і засобів захисту), що забезпечило зростання врожайності. Для масштабного впровадження цих інновацій критично важливою є подальша синергія між розробниками технологій та фахівцями галузі.

Список використаних джерел:

1. Васильковська К.В., Андрієнко О.О., Шепілова Т.П.(2023) Ефективність агродронів в системі точного землеробства. Аграрні інновації (*The effectiveness of agricultural drones in precision farming. Agricultural innovations*). Вип. 16. С. 13-18. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov>. (дата звернення: 2023.17.2).
2. Журнал АГРОНОМ 28 листопада 2020. Tevel Aerobotics Technologies розробила літаючих роботів для збору фруктів. <https://www.agronom.com.ua/tevel-aerobotics-technologies-rozroblyala-litayuchyh-robotiv-dlya-zboru-fruktiv/>.
3. Комарова Н.В. Скрипник Л. Р., Камінецька О. В., Крупа Н. М. (2025). Сталій розвиток садівництва в Україні: екологічні та економічні аспекти (*Sustainable development of horticulture in Ukraine: environmental and economic aspects*). *Агросвіт*. № 4. С. 91–97. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2025.4.91>.
4. Комбайн KAREN – найбільш ефективне рішення для механізованого збирання ягід (2024) *The KAREN harvester is the most efficient solution for mechanized berry harvesting*). Журнал «Ягідник» 4 липня 2024 року. <https://www.jagodnik.info/kombajn-karen-najbilsh-efektyvne-rishennya-dlya-mehanizovanogo-zbyrannya-yagid/>.
5. Компанії IRRIME (*Irrimec*, <https://www.irrimec.com>).
6. Крапельне зрошення для садів та виноградників. Компанія «Ірригатор Україна». <https://irrigator.ua/kapelnoe-oroshenie-dlya-sadov/>
7. Мілаєва І. І., Мілаєв О. І.(2020). Історія розвитку, перспективи застосування електромобільної техніки (*The History of Development and Future Prospects for Electric Vehicle Technology*). Праці ТДАТУ 2020 р. Вип. 20, Т. 4. с. 239-245. DOI: 10.31388/2078-0877-2020-20-4-239-246
8. Мірзоева Т. В., Жарун О., В., Коротєєв М. А. (2025). Обґрунтування перспектив розвитку садівництва в Україні з урахуванням притаманних йому ризиків (*Justification of the prospects for the*

development of horticulture in Ukraine, taking into account the risks inherent in it). Журнал «Сталий розвиток економіки» № 2 (53). DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2025-53-17>.

9. Слепцова Л. П. (2025). Стан розвитку садівництва в Україні (*The state of horticulture development in Ukraine*). Вісник аграрної науки, № 11 (872), <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202511-08>

10. Славінський В.О. (2008). Особливості поверхневого обробітку ґрунту в садах за інтенсивною технологією із застосуванням крапельного зрошення (*Features of surface soil cultivation in orchards using intensive technology with drip irrigation*). Техніка АПК. №9, 10. С. 37–38.

11. Привалов І. С., Тимошок І. В., Соколов В. О., Майбенко М. І., Петренко С.О. (2015). Нові машини для галузі садівництва України (*New machines for the horticulture industry in Ukraine*). Садівництво, 209-216.

12. Тимошок І.В. (2016). Технології догляду за ґрунтом у садах (*Soil care technologies in orchards*). Журнал «Агробізнес Сьогодні» виноград» 29 грудня. <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1252-tekhnologii-dohliadu-za-gruntom-u-sadakh.html>.

13. Опришко О.О., Ромашук О.М., Цицюрський Ю.Л. (2025). Робототехнічні комплекси і системи: Навчальний посібник (Robotic complexes and systems: Textbook) / Київ: НУБіП України, 256 с.

14. Савченко О.А. (2025). Використання безпілотних літальних апаратів у моніторингу сільськогосподарських земель (Use of unmanned aerial vehicles in monitoring agricultural land). Збірник статей II Всеукраїнської науково-практичної конференції Полтавського державного університету. Полтава 17 квітня. С. 201 – 203.

15. Осіпов М.Ю., Рудь А.В. (2024). Інноваційні підходи до управління агрономічними процесами з використанням робототехніки та штучного інтелекту (*Innovative approaches to managing agronomic processes using robotics and artificial intelligence*). Технічні науки. Випуск 4(45). С. 81. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-4.11>.

16. Поляков О. (2021). Штучний інтелект в агровиробництві. Інноваційні розробки в аграрній сфері. Молодь і технічний прогрес в АПВ (*Artificial intelligence in agricultural production. Innovative developments in the agricultural sector. Young people and technological progress in agricultural production*): матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Том 2. Харків: ХНТУСГ, С. 408-409. <https://khntusg.com.ua/wp-content/uploads>

17. Ромашенко М.І., Рокачинський А.М., Корюненко А.Т. (2015) Краплинне зрошення: Навчальний посібник (Drip irrigation: Textbook) / та ін. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 300 с.

18. Садова платформа N.BLOSI (Італія). <https://www.nblo.si.com>

19. Самохідні садова платформа Frumaco Tecnofruit CF 105 компанії ProduceTech (The Frumaco Tecnofruit CF 105 self-propelled orchard platform from ProduceTech) <https://producetech.com/en/products/cf105-1051-110-tecnofruit-harvesting-platform/>

20. Сушко І. (2002). Світові тенденції розвитку машин для хімічного захисту рослин (*Global trends in the development of machinery for chemical plant protection*)// Ж.Пропозиція.–№ 6–С. 95–99.

21. Трактори Садові. Компанія CLAAS. <https://www.claas.com/en-gb/press/press-releases/2025-11-09-nexos-2-cmatic>.

22. Тунельний обприскувач для виноградників економить засоби захисту рослин та паливо на 40% (*The tunnel sprayer for vineyards reduces the use of pesticides and fuel by 40%*). ПП «Агрореммаш-Плюс. <https://www.agrortmmash-plus.com>.

23. Хаблук С. (2023). Мультиспектральний аналіз садів дронами (*Multispectral analysis of orchards using drones*) Медіа-ресурс GrowHow.in.ua 23 червня. <https://www.growhow.in.ua/multyspektralnyy-analiz-sadiv-dronamy-dlia-proridzhuvannia-tsvitinnia/>.

24. Apple Harvester 3 збирає яблуко за 7 секунд. Журнал AgroTimes 20 травня 2021 р. <https://www.ukrinform.ua/rubric-yakisne-zhyttia/3236469-v-avstralii-rozrobili-robotu-akij-moze-zbirati-odne-abluko-za-7-sekund.html>.

25. Das, R.; Bhat, S.; Katuria, S.; Singh, R.; Chhabra, G.; Malik, P. (2023) Technological advances in horticulture 4.0 based on artificial intelligence and the Internet of Things. In Proceedings of IEEE Devices for Integrated Circuit (DevIC). Kalyani, India, April 7–8.

26. Kaur, B., Dimri, S., Singh, J., et al. (2023). Analysis of harvesting tools and equipment for horticultural crops: from then to now, Journal of Agricultural and Food Research. 14, <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100814>.

27. Miranda Sazo, M., DeMaree, A., and Robinson, T. 2010. The Platform Factor – Labor Positioning Machines Producing Good Results for NY Apple Industry. NY Fruit Quarterly 18(2): 5–9. <https://nyshs.org/wp-content/uploads/2017/05/Wells-Pages-35-38-NYFQ-spring-book-2017.pdf>

28. Obaidin, K., Yusef, B. et al. (2022). A Review of Intelligent Irrigation Systems Using the Internet of Things, *Energy Nexus*. 7, <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>, 100124.

29. SICMA S.p.A. 2025. Міжрядний культиватор для виноградників та садів (*Inter-row cultivator for vineyards and orchards*). Компанія. <https://sicma.it/wp-content/schede-prodotti/interfilari/eng/Interfilare-Gruppo-Erpice-Rotante-Scheda-Prodotta.pdf>

30. Tevel Aerobotics Technologies розробила літаючі роботи для збирання фруктів. <https://www.agronom.com.ua/tevel-aerobotics-technologies-rozrobyla-litayuchyh-robotiv-dlya-zboru-fruktiv/>.

31. Zhou H., Wang H., Au W., Kang H., and Chen K. (2022). Intelligent robots for fruit harvesting: recent developments and future challenges, *Precision Agriculture.*, № 5, 1856–1907. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09913-3>

Дата надходження статті до видання: 02.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

О. В. Бондарук^[0009-0004-6722-3986], А. С. Осадчий^[0009-0005-7646-4156], М. С. Вавдіюк^[0009-0000-8713-739X]

Луцький національний технічний університет

**ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТІВ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ
ГРАФІВ: МЕРЕЖА МУЗЕЇВ ТА "ЛУЦЬКІ КЛИКУНИ"**

Анотація. У статті розглядається задача алгоритмічної оптимізації туристичних маршрутів на макрорівні (регіон) та мікрорівні (місто) на основі теорії графів. Дослідження базується на двох практичних кейсах у Волинській області: мережі з 7 музеїв та тематичного пішохідного маршруту з 21 скульптури «Луцьких Кликунів». Культурні об'єкти змодельовано у вигляді вершин зв'язаних графів, де вагами виступають відстані або витрати на подорож. Програмна реалізація на мові Python об'єднує різні алгоритмічні підходи: для побудови ефективних циклів музейної мережі застосовано алгоритми Дейкстри, Крускала та евристику найближчого сусіда, а для оптимізації міського маршруту (задача комівояжера) - комбінацію жадібного алгоритму з локальною оптимізацією 2-орт. Результати підтверджують універсальність розробленого підходу: сформовано надійну модель для регіонального планування та розраховано оптимальний пішохідний маршрут довжиною 11,5 км, доступний для одноденної екскурсії.

Ключові слова: теорія графів, задача комівояжера, оптимізація маршруту, алгоритм Дейкстри, алгоритм Крускала, логістика туризму, культурна спадщина Волині, Python, Луцьк, Луцькі Кликуни, алгоритм 2-орт, матриця Лапласіана.

O.V. Bondaruk, A. S. Osadchyi, M. S. Vavdiuk

**OPTIMIZATION OF CULTURAL HERITAGE ROUTES USING GRAPH THEORY
METHODS: MUSEUM NETWORK AND "LUTSK KLIKUNS"**

Abstract. This paper addresses the problem of mathematical modeling and algorithmic optimization of tourist routes at macro- (regional) and micro- (urban) levels using graph theory. The research is based on two case studies in the Volyn region: a logistic network of seven key museums and a themed walking route featuring 21 "Lutsk Klikuns" bronze sculptures. The methodology involves representing the spatial distribution of cultural objects as weighted undirected graphs, where edges reflect real logistical costs (time, fuel, or pedestrian distance). The software implementation, performed in Python (Jupyter Notebook, NumPy), integrates distinct algorithmic strategies for different scales. For the regional museum network, Dijkstra's algorithm, the Nearest Neighbor heuristic, and Kruskal's algorithm were applied to construct a minimum spanning tree and cost-efficient cycles. For the urban pedestrian route, a combination of the Greedy algorithm and 2-opt local optimization was employed to solve the Traveling Salesman Problem. The results demonstrate the universality of the proposed approach: a logistically sound itinerary minimizing transit costs was created for automobile tourism, while an optimal pedestrian path of approximately 11.5 km (starting from point A1) was calculated for the city tour. The practical significance of the work lies in automating the planning of cultural expeditions and enhancing the tourist experience through scientifically grounded navigation.

Keywords: graph theory, Dijkstra's algorithm, Kruskal's algorithm, tourism logistics, cultural heritage of Volyn, Python, Traveling Salesman Problem (TSP), route optimization, tourism, Lutsk, Lutsk Klikuns, 2-opt algorithm, Laplacian matrix.

Introduction. Efficient planning of tourist routes between cultural heritage objects is an important practical task in modern urban navigation and decision-support systems [3, 7]. Museums and historical landmarks can be naturally represented as vertices of a weighted graph, where edges correspond to travel distances or time costs between locations [8]. Within this framework, classical graph algorithms provide a reliable mathematical and computational foundation for solving route optimization problems related to tourism and cultural infrastructure, such as the Traveling Salesman Problem (TSP) or Vehicle Routing Problem (VRP) [1, 9]. Fundamental approaches, including Dijkstra's algorithm and local search heuristics like 2-opt, remain relevant for creating practical navigation solutions [2, 6].

Lutsk, the historic center of the Volyn region, serves as an ideal case study for applying these methods due to its unique cultural heritage. One of the modern tourist attractions of the city is the "Lutsk Klikuns" (town criers). Historically, these were guards who patrolled the castle walls, announced the time, and warned of danger. Today, the memory of this profession is preserved in the form of 21 bronze sculptures installed in various parts of the city. While the cultural value of these objects is undeniable, their geographical distribution presents a logistical challenge. The sculptures are scattered across the city - from the central park and the Old Town to remote railway areas. Similarly, on a regional level, the network of museums in Volyn requires efficient logistical planning to minimize travel costs between distant settlements.

For a tourist unfamiliar with the topography, visiting these locations can turn into a chaotic and exhausting experience, leading to wasted time and missed objects. Therefore, the task of building optimal routes - both for pedestrian city tours and regional vehicle travel - using mathematical modeling is an urgent scientific and practical task.

© О. В. Бондарук, А. С. Осадчий, М. С. Вавдіюк

The scientific novelty of this study lies in the integrated application of classical graph algorithms to a small-scale regional cultural heritage network based on real geographic data, combined with comparative evaluation using MST as a lower bound.

Analysis of recent research and publications. The problem of finding the shortest route through a set of points is known in mathematics as the Traveling Salesman Problem (TSP). Since finding an exact solution for a large number of vertices is an NP-hard problem, heuristic algorithms are usually employed in tourism applications. Scientists such as Applegate and Cook [1] have significantly advanced the methods of solving TSP.

For determining shortest paths in weighted graphs with non-negative edge weights, Dijkstra's algorithm remains one of the most widely used methods, as stated in [2]. In applied routing and navigation problems, greedy heuristics such as the Nearest Neighbor method are often combined with shortest-path computations to construct feasible visiting sequences within acceptable computational time. To further optimize the route, local search methods like k-opt (Lin-Kernighan) are used, as described in the works of Helsgaun [6].

In the field of logistics and vehicle routing (VRP), significant contributions have been made by Toth and Vigo [9]. However, most existing navigation solutions focus on automobile transport, ignoring the specifics of pedestrian infrastructure (sidewalks, crossings, park paths) and the unique requirements of urban cultural heritage sites, a gap highlighted in recent studies by Gavalas [3, 4] and Rodriguez [8].

Unsolved aspects of the general problem. Despite the extensive theoretical development of graph algorithms, their application to small-scale cultural heritage networks based on real geographic data remains insufficiently documented. In particular, the combined use of shortest-path algorithms and greedy route construction methods for museum networks has not been thoroughly analyzed in the context of applied and educational research. This creates a gap between theoretical algorithmic studies and practical route-planning solutions for regional cultural tourism. Furthermore, in practical terms, existing general navigation applications (such as Google Maps or Waze) typically focus on building a route between two points. Creating a multi-point itinerary (e.g., involving 21 distinct locations) with automatic sequence optimization remains a non-trivial task for standard users. Currently, there is no scientifically grounded, optimized route for specific cultural products like the "Lutsk Klikuns" quest that takes into account the real topology of the city's pedestrian network.

Paper objective. The goal of this paper is to develop and implement a unified algorithmic approach for optimizing tourist routes at both regional and urban scales using classical graph theory and heuristic methods within the Python programming environment. The study targets two distinct practical applications: constructing an efficient logistic network between museums in the Volyn region and generating an optimal pedestrian route for visiting all 21 "Lutsk Klikuns" sculptures. In this research, optimality is defined in a practical sense - as the construction of closed routes where total length is minimized subject to real geographic data and infrastructure constraints. The proposed approach does not aim to find a global exact solution to the Traveling Salesman Problem (TSP), but rather to obtain near-optimal, computationally efficient itineraries suitable for real-world tourism. The effectiveness of the developed solutions is evaluated by minimizing total travel distance and comparing the results against theoretical lower bounds, such as the minimum spanning tree of the network.

Main material. Case Study: Regional Museum Network. 1. Problem formulation. Mathematical modeling of a tourist route requires representing the inter-city space as a weighted graph $G = (V, E)$, where the set of vertices V represents museums, and the set of edges E represents transport routes between them (visualized in Fig. 1). $\forall e \in E$ has a weight $w(e)$ corresponding to the geographical distance in kilometers.

In this study, we consider the problem of constructing an optimal tourist cycle that starts and ends at the same vertex. A key feature of this problem in a real environment is that the optimal sequence of visits to all museums does not always allow for a simple Hamiltonian cycle. Due to the specific location of roads, the shortest path between two non-adjacent attractions in the sequence may require passing through already visited vertices or edges more than once. Therefore, the tourist route is defined as a closed walk of minimum total weight $L = \sum w(e_i)$ which covers all target vertices of the graph. This formulation reflects realistic transport constraints and allows intermediate transit through previously visited locations when necessary.

To ensure consistency, several formal assumptions have been made. We assume that the graph is connected, which guarantees that every museum is accessible from any starting point. Distances are considered symmetric, $w(v_i, v_j) = w(v_j, v_i)$. In addition, the model relies on triangle inequality, i.e., the weight of an edge between two vertices is always less than or equal to the sum of the weights of any

alternative path between them. These assumptions allow us to consider the distances between landmarks as a metric space.

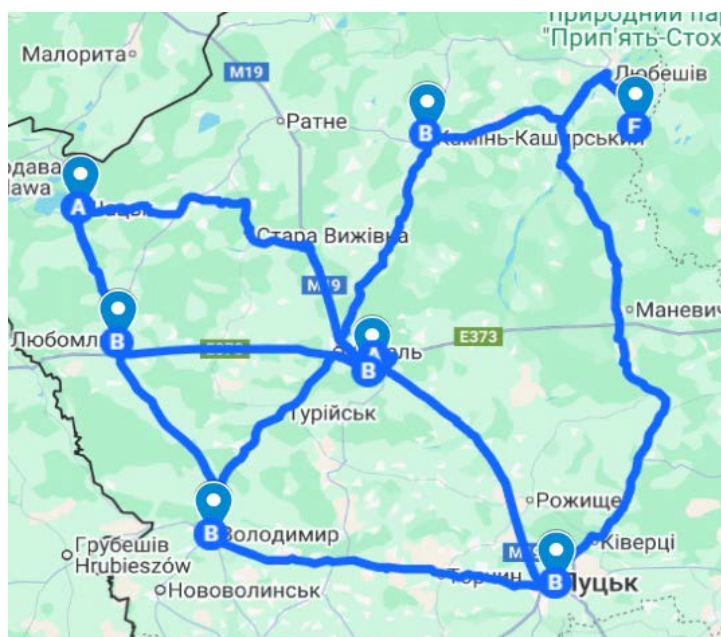


Fig. 1. Graph representation of the Volyn museum network.

Description of algorithms. The problem of constructing an optimal tourist route is a practical application of the traveling salesman problem (TSP), which is classified as an NP-hard problem. For the purposes of this study, we use a combination of classical graph algorithms to achieve an effective routing strategy for various urban cultural sites.

Dijkstra's algorithm. Dijkstra's algorithm is used to determine the shortest path between any two vertices in a basic transport network. In our study, we apply this algorithm to calculate the distance matrix $n \times n$ for selected sets of objects, ensuring that each pairwise distance used in subsequent steps is the absolute minimum allowed by the urban infrastructure.

Nearest Neighbor (NN) heuristic. To build a sequence of visits, we use the nearest neighbor heuristic. This “greedy” algorithm starts from a selected location and repeatedly visits the nearest unvisited object until all locations are included, finally returning to the starting point. This approach is particularly effective for tourist navigation because it mimics natural human decision-making.

Kruskal's algorithm. We use Kruskal's algorithm to construct the minimum spanning tree (MST) of the network. The MST represents the minimum connection cost and serves as a theoretical benchmark for evaluating the efficiency of routes generated by the nearest neighbor method.

Data description. The effectiveness and accuracy of route optimization directly depend on the quality of the input spatial data. For case study 1, a group of seven key cultural sites in the Volyn region was selected: Kamin-Kashyrskyi Folk Museum of Local History, Luboml Local History Museum, The Kosach Estate, Volyn Regional Museum of Local History, Lobnensky Museum of Partisan Glory, Museum of Flora and Fauna of Shatsk Forest College, Volodymyr Historical Museum named after O. M. Dvernytsky.

Information about these institutions, their exact geographical location, and status was collected based on data from open government and specialized sources. In particular, materials from the information portal “Museum Space of Volyn,” data from the Museum Fund of Ukraine, and official web resources of territorial communities were used. A 7×7 distance matrix was created to represent the distances between these objects mathematically (Table 1). Data was collected by analyzing routes on Google My Maps online maps. This made it possible to obtain real distance measurements in kilometers, taking into account the public road network of the Volyn region and the optimal routes between settlements. It should be noted that some elements of this matrix are undefined. This is due to the geographical location of objects in different areas of the region and the peculiarities of the road infrastructure: in certain cases, direct road connections between two museums may be irrational. In such situations, the algorithm considers these routes to have infinite weight ($w = \infty$), which encourages the construction of a route through key logistics hubs and main roads in the region.

- 1- Kamin-Kashyrskyi Folk Museum of Local History
- 2 - Luboml Local History Museum
- 3 - The Kosach Estate

© О. В. Бондарук, А. С. Осадчий, М. С. Вавдіюк

- 4 - Volyn Regional Museum of Local History
 5 - Lobnensky Museum of Partisan Glory
 6 - Museum of Flora and Fauna of Shatsk Forest College
 7 - Volodymyr Historical Museum named after O. M. Dvernitsky

Table 1

Distance matrix between museums in kilometers

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	-	61.8	-	60.6	-	-
2	-	0	59	-	-	32	52
3	61.8	59	0	66	-	93	60
4	-	-	66	0	151.1	-	77
5	60.6	-	-	151.1	0	-	-
6	-	32	93	-	-	0	-
7	-	52	60	77	-	-	0

Experimental implementation. To verify the theoretical models described for case study 1, a software implementation was carried out in Python. Below is a description of the development environment, a detailed analysis of the code construction logic, and the stages of calculating the optimal route for the selected museum network.

The algorithms were developed and tested in the interactive Jupyter Notebook environment. This tool was chosen because it allows step-by-step execution of computational blocks, which is critical for verifying the intermediate results of the Dijkstra algorithm. The environment allows for isolated debugging of individual modules - from the preparation of the initial matrix to the final reconstruction of the path - and instant verification of the state of data arrays without the need to restart the entire program. The NumPy library was used for manipulating numerical data and working efficiently with the distance matrix.

The process of finding the optimal path is based on the sequential execution of the main stages of data processing, which are implemented in the form of interconnected functions in the Jupyter Notebook environment.

Module for finding the shortest paths (Dijkstra's function). The program uses a graph adjacency matrix that was manually initialized based on collected geographic data, where pairs of museums without a direct connection are assigned an infinite value. The dijkstra function calculates the minimum distances from each of the 7 points to all others. This iterative process allows the program to select the nearest unvisited vertex each time and update the weights of the paths through it. In parallel with this, a list of predecessors is formed - a data structure that remembers the node from which we arrived at the current point, which is key for further visualization of real movement.

Tourist cycle formation module (tsp function). At the next stage, using the already formed complete matrix of shortest distances `dist_matrix`, the "nearest neighbor" strategy is implemented within the tsp function. Starting from the selected starting point `start_node_index`, the algorithm sequentially selects the nearest unvisited museum until it covers all 7 locations in the area. An important feature of the developed logic is automatic route closure: after visiting the last object, the program independently calculates the return path to the starting point, forming a complete cycle.

Transit route reconstruction module (`reconstruct_path` function). The final stage is devoted to the complete reconstruction of transit routes. Since direct connections between individual museums in Volyn are often impossible, the program uses the `reconstruct_path` function. It works on the basis of an array of predecessors and recursively unfolds each segment of the route, adding all the necessary intermediate nodes. This transforms an abstract sequence of museums into a detailed chain of indices, a path list suitable for navigation.

Connectivity analysis using Kruskal's algorithm (`kruskal` function). A separate block of the program is dedicated to constructing a minimum spanning tree (MST) using the `kruskal` function. The process involves sorting all available road connections by length and gradually adding the shortest edges to the overall network. To manage connectivity components and prevent the formation of cycles in the code, a system of auxiliary functions is used, where `get_root` searches for the root for the current set using the path compression method, while `join_sets` and `join_groups` provide logical merging of components, with `join_groups` interacting directly with root elements to establish connections between different groups of vertices. This complex algorithm allows us to determine the theoretical minimum length of roads required to connect all seven museums into a single network, which becomes a benchmark for comparison with the

results of the tourist route obtained. The complete implementation of the features discussed above can be accessed in our GitHub repository [11].

Case study: Cultural Heritage Trail "Lutsk Klikuns". 1. Problem formulation. To solve the problem of optimizing the excursion route, the apparatus of graph theory was used. The city road network is modeled as a weighted graph $G = (V, E)$, where $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ is the set of vertices corresponding to the locations of the "Lutsk Klikuns" sculptures ($n = 21$), and E is the set of edges connecting them. Each edge (i, j) is assigned a weight w_{ij} , which corresponds to the pedestrian distance between points i and j in meters. The task is reduced to finding the Hamiltonian path (or circuit) of minimum length that passes through all vertices of the graph exactly once. Mathematically, the objective function for the Traveling Salesman Problem (TSP) is minimized:

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} w_{p_i p_{i+1}} + w_{p_n p_1} \rightarrow \min$$

where p is the permutation of vertices representing the order of visiting the objects.

Description of algorithms. The computational experiment was conducted in the interactive environment Jupyter Notebook. The software implementation was performed using the Python 3.13.5 programming language [10]. A distinctive feature of the developed solution is the refusal to use heavy external frameworks for graph processing. Instead, a native implementation of algorithms [2] was created using standard Python libraries, which ensures high code performance and ease of deployment.

1. Microsoft Excel was used to collect, structure, and store the initial dataset (coordinates and distance matrix).

2. Google My Maps service was used to visualize the route nodes and verify the pedestrian accessibility of the paths.

3. The complete source code and dataset are available at GitHub repository [12]

Two algorithmic approaches were implemented in the program code to find the solution:

a) *Greedy Algorithm (Nearest Neighbor)*. The basic algorithm selects the nearest unvisited node as the next step. It is computationally fast but often leads to suboptimal solutions due to "local traps", creating excessive loops at the end of the route.

b) *2-opt Heuristic Optimization*. To improve the route obtained by the greedy method, the 2-opt local search algorithm was applied manually. The essence of the method is to iteratively check for intersections in the route graph. If the inequality holds:

$$\text{dist}(A, C) + \text{dist}(B, D) < \text{dist}(A, B) + \text{dist}(C, D)$$

then edges (A, B) and (C, D) are removed, and the route is reconnected through edges (A, C) and (B, D) . This procedure is repeated until no further improvements are possible, eliminating inefficient "zigzags" in the path.

Research results. Case Study: Regional Museum Network. To verify the theoretical models described above, a software implementation was developed in the Python programming language. This section outlines the computational environment, the structure of the implemented algorithms, and the main stages involved in constructing an efficient tourist route for the selected museum network.

The algorithms were implemented and tested in the interactive Jupyter Notebook environment. This environment was chosen because it supports step-by-step execution of computational blocks, which is essential for monitoring intermediate results, particularly during the execution of Dijkstra's algorithm. Such an approach enables isolated debugging of individual modules, ranging from the initialization of the distance matrix to the final reconstruction of the tourist route. Numerical computations and matrix operations were performed using the NumPy library [5].

Analysis of the routes obtained. The use of the Dijkstra function made it possible to form a complete distance matrix, eliminating the problem of the absence of direct roads between distant objects. Visualization of one of the constructed routes (Fig. 2), starting from the Volyn Regional Museum of Local History (vertex 3, Lutsk), demonstrates the algorithm's ability to construct a complete logistical trajectory. The total distance of the calculated tourist cycle was 574.50 km, which is an acceptable indicator for a multi-day car trip through the region.

During the experiment, the optimal route was obtained with the start and end at vertex 3 (Lutsk): $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 2 \rightarrow 0 \rightarrow 4 \rightarrow 3$. Analysis of this sequence shows that although tourists have to pass through certain nodes (for example, vertices 1 - Luboml and 2 - Kolodyazhne) more than once, such a route is mathematically and practically the most optimal for this road configuration. Repeated visits are due to the tree-like structure of the road network in certain parts of the region, where certain locations have a

limited number of connecting highways. Returning through already visited points in such conditions is a necessary condition for minimizing the total distance compared to using significantly longer detours. The efficiency of the constructed route was assessed by comparing its total length (574.50 km) with the weight of the minimum spanning tree (MST), which was 331.4 km. In this study, the MST acts as the lower limit of theoretical connectivity. Although the tourist cycle exceeds the MST in length, this is explained by the need to close the route and return to the starting point, as well as the specifics of transit routes. The small gap between these indicators, given the actual topology of the roads, indicates the high quality of the solution found.

The developed approach has direct practical significance for the development of domestic tourism, since automated calculations allow for the optimization of fuel and time costs for organized tour groups and the creation of dynamic itineraries that can be adjusted to the selected starting point (e.g., Lutsk, Volodymyr, or Luboml), and provide effective logistical support for regional cultural events.

Despite its successful implementation, the study revealed certain limitations of the nearest neighbor heuristic used. The main drawback is the algorithm's "short-sightedness": in the final stages of cycle construction, it may be forced to choose very long edges to return to the remaining points, which sometimes significantly increases the final distance. In addition, the model is based on static geographical distances and does not take into account dynamic factors such as current road conditions, traffic jams, or seasonal traffic restrictions.

The experiments confirmed the viability of the mathematical model. The resulting route is logistically justified and demonstrates a balance between the complexity of calculations and the quality of the final result. Further improvement of the system may consist in the integration of local search algorithms (e.g., 2-opt) to minimize route intersections and take into account the opening hours of museums.

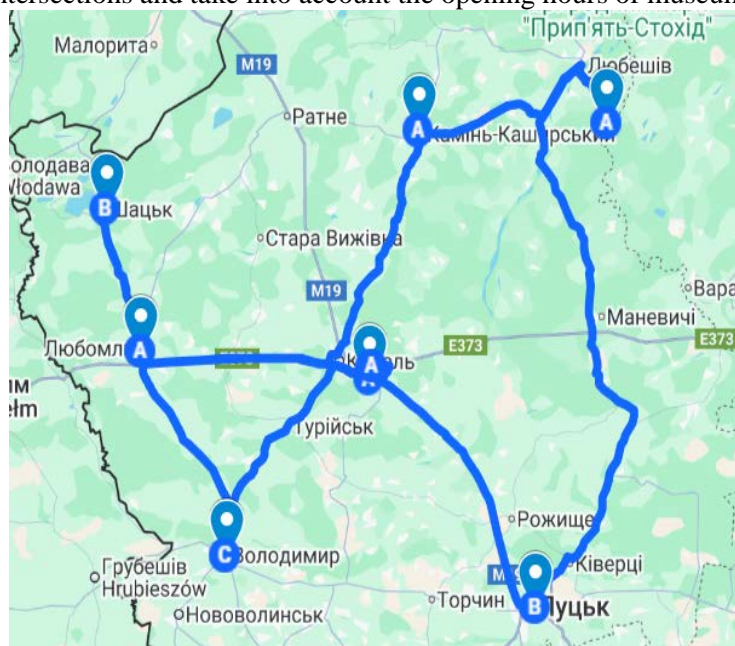


Fig. 2. Visualization of one of the routes (starting point - Volyn Regional Museum of Local History), constructed based on the application of algorithms.

Case study: Cultural Heritage Trail "Lutsk Klikuns". The starting point was chosen as A1, where the sculpture "Radyk Zadovolenyi" is located. To interpret the matrix, the correspondence of codes to the first 7 sculptures is as follows: A1 - Radyk Zadovolenyi, B2 - Zustrichayko, C3 - Hnat, D4 - Vasyl «Soloveiko», E5 - Franyo, F6 - Khvatskó and Prudkó, G7 - Knyzhko. The first result of the study is the distance matrix calculated for these points. A fragment of this data is presented in Table 2. For better visual perception, a color gradient is applied to the cells: the darker the shade, the greater the distance between the objects. The full distance matrix is provided in the "Distance matrix" worksheet of the "Table for the graph_Lutsk Klikuns_.xlsx" file, available in the repository [12].

Before applying the routing algorithms, the structural properties of the graph were analyzed using the Laplacian matrix. Given the large dimension of the network ($n = 21$), the full matrix is provided in the "Laplacian matrix" worksheet of the "Table for the graph_Lutsk Klikuns_.xlsx" file, available in the repository [12]. Below is the principal fragment (Table 3) corresponding to the first 7 vertices (7x7).

Table 2

Fragment of the distance matrix between the first 7 locations of "Lutsk Klikuns" in meters

		A1	B2	C3	D4	E5	F6	G7
1	A	-	285	326	439	504	539	447
		0	0	0	0	0	0	0
2	B	285	-	101	208	285	320	220
		0	0	0	0	0	0	0
3	C	326	101	-	115	191	230	136
		0	0	0	0	0	0	0
4	D	439	208	115	-	865	145	779
		0	0	0	0	0	0	0
5	E	504	285	191	865	-	572	106
		0	0	0	0	0	0	0
	F6	539	320	230	145	572	-	962
		0	0	0	0	0	0	0
7	G	447	220	136	779	106	962	-
		0	0	0	0	0	0	0

Table 3

Fragment of the Laplacian matrix (7x7)

	A1	B2	C3	D4	E5	F6	G7
A1	20	-1	-1	-1	-1	-1	-1
B2	-1	20	-1	-1	-1	-1	-1
C3	-1	-1	20	-1	-1	-1	-1
D4	-1	-1	-1	20	-1	-1	-1
E5	-1	-1	-1	-1	20	-1	-1
F6	-1	-1	-1	-1	-1	20	-1
G7	-1	-1	-1	-1	-1	-1	20

The algebraic properties of this matrix (specifically the Fiedler value $\lambda_2 > 0$) confirm that the graph is fully connected, allowing for the construction of a valid Hamiltonian cycle.

The geographical distribution of the 21 historical sculptures ("vertices") across the city map is shown in Fig. 3 (a). The same figure also illustrates the constructed pedestrian graph (Fig. 3 (b)), including all potential edges between the tourist objects, which demonstrates the high density and complexity of the route network.

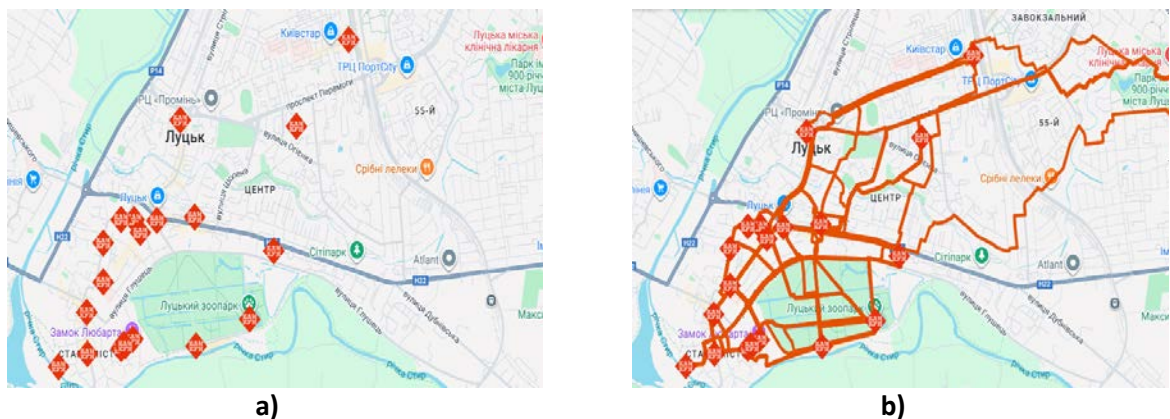


Fig. 3. Location of the "Lutsk Klikuns" vertices and visualization of the pedestrian graph edges on the city map.

For the mathematical analysis, the pedestrian network was represented as an abstract weighted graph (Fig. 4 (a)) suitable for algorithmic processing. An initial route was constructed using a Greedy heuristic and then refined using the 2-opt optimization algorithm. The resulting Hamiltonian path and the corresponding structural graph model are shown in Fig. 4 (b).

Route sequence: A1 (Radyk Zadovolenyi) → B2 (Zustrichayko) → C3 (Hnat) → D4 (Vasyl «Soloveiko») → E5 (Franyo) → F6 (Khvatsko and Prudko) → L12 (Vertun) → N14 (Klikun Andrii) →

M13 (Vartko and Vartko) → O15 (Stephan) → T20 (Vogniar) → U21 (Mykytovych) → S19 (Bratko and Bratko) → R18 (Providnyk) → Q17 (Kliuchnyk) → P16 (Kavus) → K11 (Muzyka) → J10 (Trylinko) → I9 (Zirko) → G7 (Knyzhko) → H8 (Semen Gust).

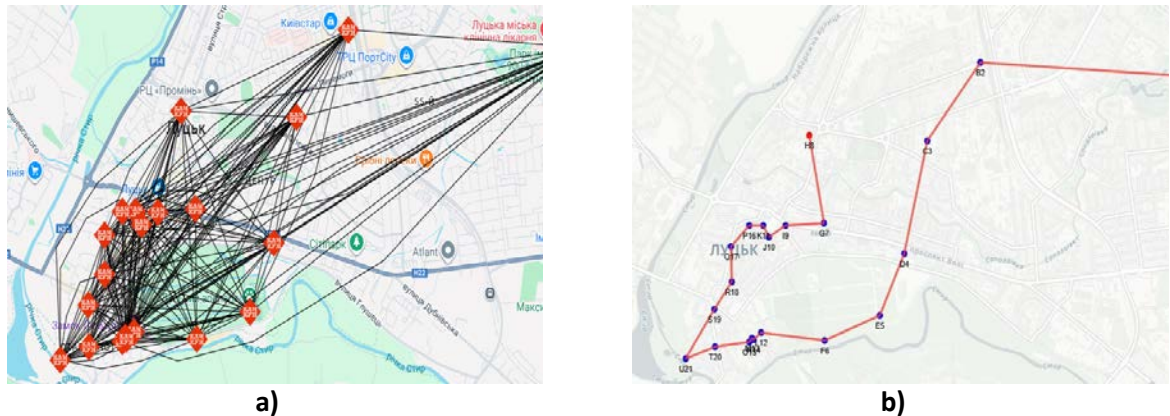


Fig. 4. Graph model of connections between tourist objects and the optimized pedestrian route obtained using the Greedy + 2-opt algorithm.

Quantitative indicators:

1. Total number of vertices: 21.
2. Number of unique edges analyzed: 210.
3. Total length of the optimized route: 11,503 meters.

Visual analysis of the built route (Fig. 4 (b)) shows that the algorithm successfully avoided large "zigzags" and backtracking. For a tourist moving at an average speed of 4 km/h, the pure walking time will be approximately 3 hours. Taking into account stops for photos and sightseeing (10-15 minutes per point), the total duration of the excursion will be 6-7 hours, which fits perfectly into a one-day tourist program. Without optimization, a random search for these locations could exceed 15-18 km, which is physically difficult for an unprepared person.

Conclusions. The study confirms that classical graph algorithms can be effectively applied to practical route planning problems in cultural tourism, bridging the gap between theoretical models and real-world navigation. The obtained results demonstrate the feasibility of combining shortest-path algorithms with heuristic methods for both regional and urban navigation tasks.

Case Study: Regional Museum Network.

1. *Algorithmic Efficiency.* The integration of Dijkstra's algorithm with the Nearest Neighbor heuristic successfully generates a complete and mathematically valid tourist cycle, effectively managing missing direct connections by calculating optimal transit paths. The calculated total route distance of 574.50 km demonstrates a reasonable and acceptable deviation from the theoretical lower bound established by the Minimum Spanning Tree (331.4 km). However, while the computational approach is highly efficient for small-scale networks, the Nearest Neighbor heuristic exhibits a "short-sightedness" limitation in the final stages of cycle construction, which can occasionally lead to the selection of longer return edges.

2. *Practical Feasibility.* The proposed model successfully fills the gap between abstract graph theory and practical tourism logistics by using real geographic data and accounting for the actual road infrastructure of the Volyn region. The algorithm effectively accounts for the tree-like topology of regional roads, proving that traversing previously visited nodes (e.g., Luboml and Kolodyazhne) is a practically justified strategy to avoid significantly longer detours. Therefore, the generated route is highly practical for real-world application, offering an optimized, ready-to-use itinerary suitable for car tourism and organized cultural expeditions.

3. *Scalability and Flexibility.* The Python-based implementation offers a flexible tool for recalculating routes based on different starting locations (e.g., Lutsk, Volodymyr, or Luboml). The program's structure allows for easy scaling, meaning new cultural heritage sites can be added to the network without altering the core algorithms. Additionally, the model can be further improved by integrating local search methods (e.g., 2-opt) to resolve path intersections, or by incorporating real-world constraints such as traffic conditions and museum operating hours.

Case study: Cultural Heritage Trail "Lutsk Klikuns".

1. *Algorithmic Efficiency.* The implementation of the Greedy algorithm combined with 2-opt local optimization in Python successfully solved the routing problem for the "Lutsk Klikuns" thematic pedestrian

route. The proposed method reduced the chaotic set of 21 locations into a structured, logistically optimal route with a total length of 11.5 km.

2. *Practical Feasibility.* A key advantage of the study is the use of real pedestrian distances rather than theoretical straight lines (Euclidean distance). This ensures that the generated route is physically feasible for an average tourist within a single-day excursion (approximately 3 - 4 hours of pure walking time). Similarly, for the regional museum network, the approach allowed for the construction of logistically sound loops that minimize travel costs.

3. *Scalability and Flexibility.* The developed software tool (script in Jupyter Notebook environment) is universal. It allows for easy scaling of the model: adding new sculptures, changing the starting point (e.g., from A1 to any other location), or adapting the algorithm for other cities without significant code modifications. This provides a flexible technological foundation for the future development of smart tourism in the Volyn region.

References

1. Applegate D. L., Bixby R. E., Chvatal V., Cook W. J. *The Traveling Salesman Problem: A Computational Study*. Princeton University Press, 2006. 608 p.
2. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. *Introduction to Algorithms*. MIT Press, 2022. 1312 p.
3. Gavalas D., Konstantopoulos C., Mastakas K., Pantziou G. Mobile recommender systems in tourism. *Journal of Network and Computer Applications*. 2014. Vol. 39. P. 319–333.
4. Gavalas D., Sylla C., Kasapakis V., Pantziou G. Algorithms for the orienteering problem in tourism. *Tourism Management Perspectives*. 2022. Vol. 41. P. 100–115.
5. Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J. et al. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020. Vol. 585. P. 357–362.
6. Helsgaun K. An effective implementation of the Lin–Kernighan traveling salesman heuristic. *European Journal of Operational Research*. 2000. Vol. 126, No. 1. P. 106–130.
7. Liu Y., Wang S., Zhang X. Graph theory applications in smart tourism route optimization. MDPI, 2023. P. 112–128.
8. Rodriguez A., Smith J. Graph-based route optimization for urban cultural heritage sites. *Journal of Heritage Tourism*. 2023. Vol. 18, No. 2. P. 145–160.
9. Toth P., Vigo D. *The Vehicle Routing Problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2014. 466 p.
10. VanderPlas J. *Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data*. O'Reilly Media, 2016. 548 p.
11. Vavdiuk M. S., Bondaruk O. V. *volyn-route-optimizer*. GitHub, 2026. [Online]. Available: <https://github.com/4marchello/volyn-route-optimizer>.
12. Vavdiuk M. S., Osadchyi A. S. *lutsk-route-optimizer*. GitHub, 2026. [Online]. Available: <https://github.com/4marchello/lutsk-route-optimizer>.

Reviewers

1. **Syasky Andriy** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics at Lutsk National Technical University.
2. **Mikulich Olena** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics at Lutsk National Technical University.

Дата надходження статті до видання: 14.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

С.В. Ягелюк^[0000-0002-7428-0848], В.С. Пуць^[0000-0003-3164-6173], В.Л. Мартинюк^[0000-0002-6914-2336]

Луцький національний технічний університет

РОБОТОТЕХНІКА – ШЛЯХ ЗАПРОВАДЖЕННЯ РЕВОЛЮЦІЇ 4,0 У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

На сучасному етапі розвитку сільськогосподарської галузі для українських виробників особливо актуальною є проблема дефіциту робочої сили, що має значний негативний вплив на процес запровадження інноваційних технологій. Така ситуація є прямою загрозою продуктової безпеки країни. Одним із актуальних напрямків вирішення даної проблеми є розроблення та запровадження роботів, які здатні замінити людину й виконувати технологічні операції автономно. У статті виконано огляд роботів, які активно запроваджуються в сільськогосподарському виробництві. Як показав огляд досліджень і чинних конструкцій роботів, вони здатні виконувати різноманітні технологічні операції від моніторингу поля до посіву й збору врожаю тим самим зменшують залежність від ручної праці. При цьому значним чином зростає продуктивність виконаних робіт і якість готової продукції.

Ключові слова: робот, робототехнічна система, сільське господарство, інновації, автоматизація.

S. Yaheliuk, V. Puts, V. Martyniuk

ROBOTICS – THE PATH TO IMPLEMENTING INDUSTRY 4.0 IN AGRICULTURE

At the current stage of development in the agricultural sector, the labor shortage is a particularly pressing issue for Ukrainian producers, significantly hindering the adoption of innovative technologies. This situation poses a direct threat to the country's food security. One of the most promising approaches to solving this problem is the development and deployment of robots capable of replacing human labor and performing agricultural operations autonomously. As a review of research and existing robot designs has shown, they are capable of performing a variety of technological operations, from field monitoring to sowing and harvesting, thereby reducing dependence on manual labor. At the same time, the productivity of the work performed and the quality of the finished product increase significantly, while the negative impact on the environment decreases. This article provides an overview of robots that are being actively introduced into agricultural production. The advantages and challenges of robot implementation are outlined. It has been established that the creation of swarm robotic systems is a promising direction for the development of robotics in agriculture.

Keywords: robot, robotic system, agriculture, innovation, automation.

Постановка проблеми. Вчені-аграрії, виробники сучасної сільськогосподарської техніки, спрямовуючи свої дослідження на вирішення проблеми забезпечення людства продуктами харчування. З цією метою останні роки ми спостерігаємо активне розроблення та застосування передових технологій в аграрному секторі.

Активний розвиток складних технологій, що базуються на використанні датчиків, GPS технологій, розроблення автономних машин дозволяють значним чином скоротити втрати урожаю, оптимізувати використання ресурсів, підвищити продуктивність й рентабельність виробництва в усіх галузях сільського господарства. В умовах сільського господарства 4,0 виробники вирішують демографічні проблеми (нестача робочих рук), обмежених ресурсів, зміни клімату та повторного використання відходів.

У якості ключового аспекту розвитку сільського господарства 4,0 можна відмітити розроблення та запровадження роботів для виконання різних задач як у рослинництві так й в тваринництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Запровадження технологічних процесів із використанням роботів, багатьма авторами [1, 2, 3] позиціонується як перспективний напрямок вирішення проблеми дефіциту робочої сили у сільському господарстві. Крім того, роботи за рахунок імітації рухів людини, замінюють їх під час виконання складних процесів, а також у небезпечних для здоров'я людей умовах [3], забезпечують високу точність і якість виконання робіт [2].

Сільське господарство виконує складне завдання – забезпечення харчової безпеки людства. Одночасно перед ним стоїть глобальна проблема зменшення викидів у навколишнє середовище. Відомо, що у сільському господарстві відбувається накопичення в ґрунтах, водних джерелах та атмосфері надлишкової кількості небезпечних речовин. Крім впливу на здоров'я людини, викиди від сільського господарства також шкодять урожаю, знижують урожайність, ушкоджують екосистеми та зменшують біорізноманіття [4]. Вирішити дану проблему допомагають роботи.

З урахуванням цього, багато вчених зосереджують свої наукові дослідження на вирішенні даної проблеми. Зокрема критично важливим є вирішення проблеми зменшення кількості використовуваних у сільському господарстві агрохімікатів. На даний час обробка рослин із метою знищення бур'янів і пригнічення хвороб проводиться із застосуванням гідравлічних та

гідропневматичних обприскувачів. За умови їхнього застосування значна частина хімічних речовин потрапляють основні компоненти агрофітоценозів: ґрунти сільськогосподарських угідь, рослини, надземна та ґрунтова біота, ґрунтові води, поверхневі водні об'єкти [5]. Дрібні краплі рідини переносяться вітром на сусідні посіви або поля, що призводить до утворення залишків гербіцидів (або агрохімікатів загалом) на сільськогосподарській продукції. Це може завдати шкоди посівам, а також може бути передано кінцевому споживачеві, де це може мати значний вплив на його здоров'я.

У роботах [6, 7] авторами доведено, що використання роботів і штучного інтелекту дозволяють забезпечити високу ефективність використання ресурсів, зокрема й пестицидів. Це досягається за рахунок точного внесення пестицидів у зону розвитку бур'янів. При цьому може бути зменшене використання гербіцидів у середньому на 77% [7].

Значна частина наукових праць присвячена розроблянню та дослідженню роботів для збирання врожаю. Роботизовані системи збору врожаю привертають увагу як рішення проблем нестачі робочої сили та обмежень ефективності в сільському господарстві [9, 10, 11].

У роботі [9] авторами розроблено та досліджено модель робота YOLOv8m, який здатен аналізувати плоди томатів за стиглістю в процесі збирання. Завдяки точному виявленню стиглих плодів (99,9%) точність збору врожаю становить 83,3%, коефіцієнта пошкодження врожаю лише 4,0%.

У дослідженні [10] представлено результати проектування, та польового випробування робота для збору цитрусових. Польові експерименти, виконані для 142 зразків цитрусових показали, що 99% плодів було зірвано без пошкоджень. Застосування роботів дозволить повністю автоматизувати збір врожаю.

Як бачимо з аналізу чинних досліджень робототехніка відіграє важливу роль у сільському господарстві 4.0 та вирішує проблеми: скороченні ручної праці, підвищення продуктивності виконання технологічних процесів, зменшення витрат, покращення якості готової продукції, зменшення екологічного навантаження тощо.

Мета роботи. Аналіз напрямків застосування роботів у сільському господарстві, визначення перспектив і особливостей їхнього запровадження.

Виклад основного матеріалу. Роботи широко використовують як у рослинності, так і в тваринництві. Розглянемо деякі конструкції сільгоспроботів. Моделі унікальні і автономні: для виконання ними своїх функцій участь людини абсолютно не потрібна.

Робот для прополювання Nexus Robotics (рис. 1) - автономний робот для прополювання на базі ШІ, розроблений для овочівництва.

Nexus Robotics La Chèvre використовується для автономного прополювання на сільськогосподарських полях, особливо в овочівництві. Унікальна точність виконання технологічної операції внесення пестицидів дозволяє фермерам ефективно боротися з поширенням бур'янів, не забруднюючи навколишнє середовище.

Робот вирішує проблему нестачі робочої сили та знижує експлуатаційні витрати. Застосування La Chèvre забезпечує економію гербіцидів та фунгіцидів до 50%, сприяючи більш стійким та органічним методам ведення сільського господарства [12]. Робот також збирає дані про посіви та умови вирощування, надає фермерам інформацію в режимі реального часу для прийняття обґрунтованих рішень про родючість ґрунту, боротьбу з хворобами і прогнозування врожаю. Система навігації робота включає RTK-GPS, датчики LiDAR. Гібридна електрична трансмісія робота, оснащена електричною системою приводу, що живиться від акумуляторів, що заряджаються від бортового дизельного генератора забезпечує розширену автономність роботи в полі.

Nexus Robotics La Chèvre використовується для автономного прополювання на сільськогосподарських полях, особливо в овочівництві. Унікальна точність виконання технологічної операції внесення пестицидів дозволяє фермерам ефективно боротися з поширенням бур'янів, не забруднюючи навколишнє середовище.

Робот вирішує проблему нестачі робочої сили та знижує експлуатаційні витрати. Застосування La Chèvre забезпечує економію гербіцидів та фунгіцидів до 50%, сприяючи більш стійким та органічним методам ведення сільського господарства [12]. Робот також збирає дані про посіви та умови вирощування, надає фермерам інформацію в режимі реального часу для прийняття обґрунтованих рішень про родючість ґрунту, боротьбу з хворобами і прогнозування врожаю. Система навігації робота включає RTK-GPS, датчики LiDAR. Гібридна електрична трансмісія робота, оснащена електричною системою приводу, що живиться від акумуляторів, що заряджаються від бортового дизельного генератора забезпечує розширену автономність роботи в полі.



Рис.1. Робот для прополювання Nexus Robotics: а – загальний вигляд, б – робочий орган

На виставці Agritechnica 2025 компанія Fendt представила робота Xaver GT (рис.2) який призначено для боротьби з бур'янами на овочевих полях [13]. Ходова частина робота містить чотири колеса, які мають незалежне керування. У якості джерела енергії використано електродвигуни. Таке незалежне керування дає можливість з особливою точністю Fendt Xaver GT орієнтуватися в просторі. Робоча швидкість робота до 10 км/год. Робот точно визначає бур'яни, культурні рослини за рахунок використання штучного інтелекту. За добу робот здатен обробляти до 4 га. Згідно даних виробника та користувачів, економічний ефект від використання Nexus Robotics становить приблизно 1000 доларів з одного гектару.



Рис.2. Робот Xaver GT

© С.В. Ягелюк, В.С. Пуць, В.Л. Мартинюк

Xaver GT нагадує автономну платформу. Робот має при цьому порівняно невелику масу – 3 т. Особливістю робота є мінімальне ущільнення ґрунту навіть під час багаторазових проходів. Мінімізувати тиск на ґрунт виробникам вдалося за рахунок забезпечення рівномірного розподілу навантаження між осями.

Бельгійська робототехнічна компанія Oostinion запустила повністю автономного робота для збирання полуниці під назвою Rubion (рис.3). Робот автономно рухається по теплицям або полю, визначає ступінь стиглості ягід. Робочий орган робота здатен захоплювати ягоди з різним впливом на них (залежно від стиглості), що дає можливість зберігати їхню цілісність. Ще однією особливістю робота Rubion є здатність прогнозувати наступний урожай на основі аналізу даних про поточний врожай [14].



Рис. 3. Робот Rubion

Новим напрямком розвитку роботизованих систем у сільському господарстві є ройова робототехніка. Вчені та виробники все більше уваги приділяють вивченню процесів взаємодії роботів, які працюють у групі для виконання спільних завдань. Роева робототехніка у сільському господарстві використовується для моніторингу посівів, збору даних про якість ґрунту та виконання завдань точного землеробства, таких як цілеспрямоване застосування пестицидів.

Прикладом роевої робототехніки є проект RoboBees, також розроблений у Гарварді. RoboBees (рис. 4) – це крихітні літаючі роботи, створені для імітації поведінки бджіл. Вони можуть бути використані для виконання різних завдань, включаючи моніторинг навколишнього середовища, пошук та порятунок, а також запилення сільськогосподарських культур [15].

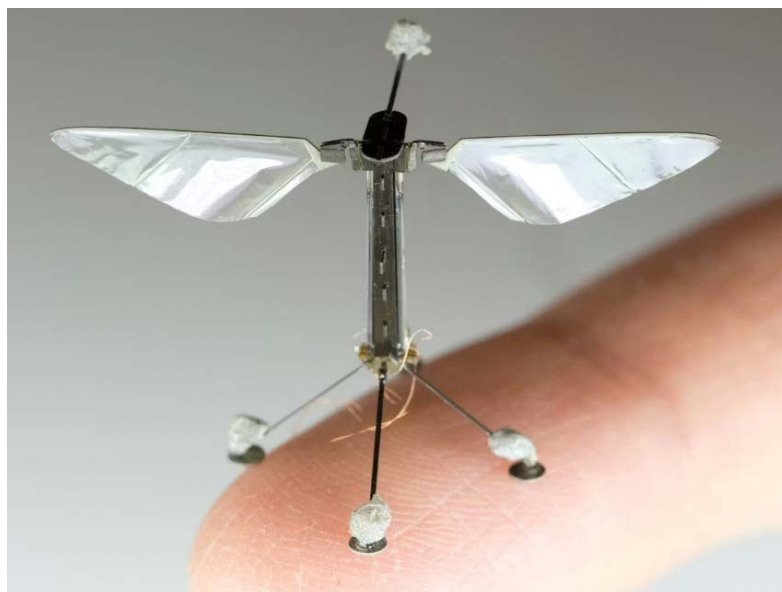


Рис. 4. Роева робототехніка RoboBees

Відомою також є роботизована система MARS (рис. 5), яка реалізує роеві принципи роботи. Роботи MARS призначені для виконання технологічного процесу висіву кукурудзи. Застосування роботизованої системи MARS дозволить замінити важкі агрегати (трактор і сівалка) й зменшити ущільнення ґрунту, а також споживання енергії важкою технікою. Крім того, запровадження роботизованої системи MARS призведе до зменшення витрат насіння, добрив та пестицидів і збільшення врожайності [16].



Рис.5. Роботизована система MARS

Система MARS реалізує інтегрований процес автоматизованого посіву з використанням гнучкої кількості роботів, які керують положенням кожного посаженого насіння. На рис. 6 показано глобальну архітектуру системи, яка поділена на 3 частини. Роботи (3) виконують процес посіву, який попередньо планується та контролюється OptiVisor (2). Хмарне середовище (1) забезпечує функцію керування даними та користувачами.

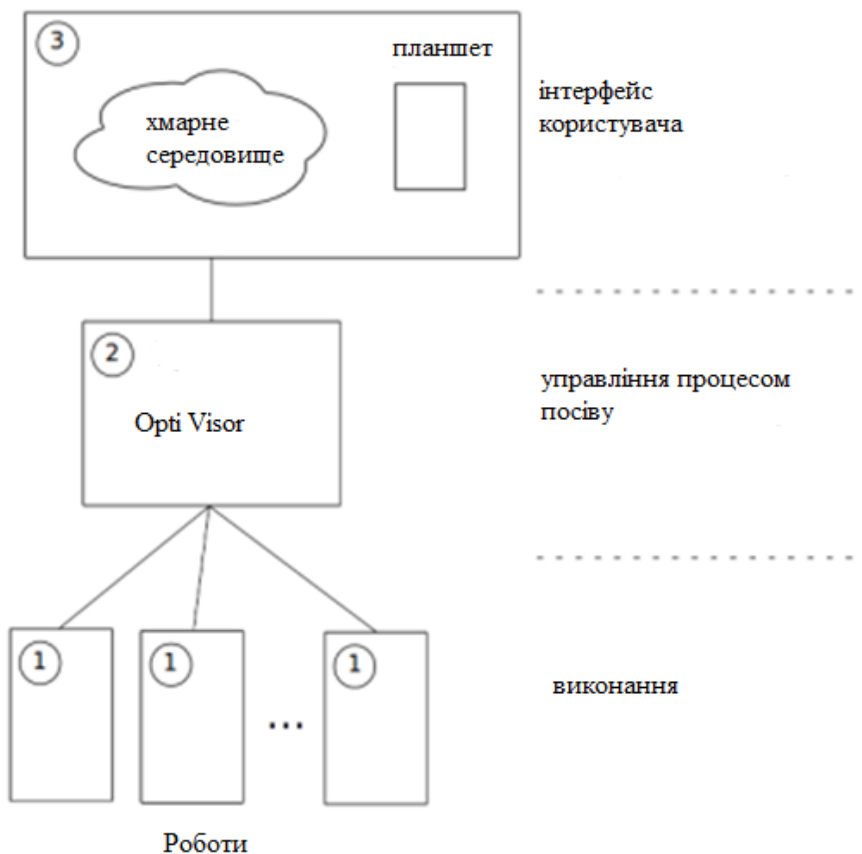


Рис. 6. Системна архітектура роботизованої системи MARS [16]

Бачимо, що для сільськогосподарського виробництва робототехніка є ефективним засобом вирішення проблем продовольчої безпеки, дефіциту робочої сили та збереження навколишнього середовища. Роботи змінюють виробничі процеси, підвищуючи їхню ефективність, сприяють зростанню продуктивності та якості їхнього виконання. Роботи зменшують залежність від ручної праці в різних сільськогосподарських процесах, що призводить до зниження витрат на оплату праці. Роботизовані системи оптимізують водні ресурси, використання добрив та пестицидів, сприяють запровадженню сталих сільськогосподарських практик [17].

Запровадження роботів у сільськогосподарське виробництво відповідає основним трендам Індустрії 4.0, яка характеризується активним розвитком автоматизації процесів, застосуванням Інтернет – речей, хмарних технологій.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.

Аналіз чинних наукових досліджень і різноманітних конструкцій роботів, які інтегруються у сільське господарство, доводить, що сучасне сільське господарство знаходиться на етапі 4.0 («Сільське господарство 4.0»). Це сприяє запровадженню процесів, які сприяють підвищенню ефективності сільськогосподарського виробництва за рахунок автоматизації й підвищення точності окремих технологічних операцій. Роботизація агропромислового комплексу дозволить:

- вирішити проблему дефіциту робочих рук в галузі;
- підвищити ефективність та продуктивність технологічних процесів;
- підвищити якість продукції;
- зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, зокрема, вирішити проблему переуцільнення ґрунтів, шкідливих викидів в атмосферу, хімічного навантаження на ґрунт і водні ресурси;

- замінити людей піл час виконання небезпечних для здоров'я роботах.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на:

- розроблення й запровадження вітчизняної робототехніки, яка буде доступною для українського виробника сільськогосподарської продукції;
- розроблення навчальних програм для підготовки висококваліфікованих робітників, здатних керувати та обслуговувати складні автоматизовані системи.

Список використаних джерел

1. Marinoudi V., Sorensen C. G., Pearson S., Bochtis D., et al. Robotics and labour in agriculture. A context consideration// Biosystems Engineering. – 2019.- Vol. 184. - P. 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.013>.
2. Marinoudi V., Lampridi M., Kateris D., Pearson S. et al. The Future of Agricultural Jobs in View of Robotization// Sustainability. – 2021. – Vol. 13(21), 12109. <https://doi.org/10.3390/su132112109>
3. Manning L. Innovating in an Uncertain World: Understanding the Social, Technical and Systemic Barriers to Farmers Adopting New Technologies// Challenges – 2024. – Vol. 15(2), 32. <https://doi.org/10.3390/challe15020032>
4. Swanson, N.L., Leu, A., Abrahamson, J., Wallet, B. Genetically engineered crops, glyphosate and the deterioration of health in the United States of America// Journal of Organic Systems. – 2014. – Vol. 9(2). P. 6–37.
5. Костенко С.О. Пестициди та агрохімікати як інновації в аграрній сфері: до питання правового регулювання «розумних меж» використання. На сторожі земельного ладу: до 20-річчя Земельного кодексу: Міжнар. наук.-практ. Конф., м. Київ, 26 листопада 2021 р. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2021. С. 92-98.
6. Das S., Wiafe E. K., Upadhyay A., et al. Design and evaluation of a vision-guided robotic platform with root-zone drilling for targeted weed removal// Computers and Electronics in Agriculture. - 2026.- Vol. 246, 111605. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111605>.
7. Aijaz N., Lan H., Raza T., et al. Artificial intelligence in agriculture: Advancing crop productivity and sustainability// Journal of Agriculture and Food Research.- 2025.-Vol. 20, 101762. - <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101762>.
8. John Deere. John Deere запускає систему See & Spray™ Select для обприскувачів серій 400 та 600. URL: <https://www.deere.com/en/news/all-news/2021mar02-john-deere-launches-see-and-spray-select/> (дата звернення 17.01. 2026).

9. Prajwal R, Parray R. A., Bhaleka D. G., Tushar Dhar, et al. Maturity detection based autonomous robotic system for tomato harvesting in green houses.// Results in Engineering. - 2026. – 110044. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110044>.
10. Espinoza J., Chinnock B., Bahne C., et al. A novel high-precision citrus harvesting robotic system for controlled stem length: Design, validation, and field evaluation//Smart Agricultural Technology. – 2026. – Vol. 13, 101918. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.101918>.
11. Li H., Chen Y., Li Z., et al. A following collaborative robot Harvesting-Assisted transport system with collaborative region constraints model for fruit harvesting//Computers and Electronics in Agriculture. – 2026. – Vol. 244. -p. 111467. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111467>.
12. Inertia. URL: <https://www.inertiapd.com/cases/autonomous-weeding-robot> (дата звернення 17.01. 2026).
13. Fendt. Press release. URL: https://www.fendt.com/php/create_pdf/pdf2/47576_web_en_2026-01-27_09-38-19.pdf (дата звернення 17.01. 2026).
14. Octinion. URL: <http://octinion.com/> (дата звернення 17.01. 2026).15. Wyss Institute. URL: <https://wyss.harvard.edu/technology/robobees-autonomous-flying-microrobots/> (дата звернення 17.01. 2026).
16. Mobile Agricultural Robot Swarms (MARS)/ AGCO GmbH (AGCO)// Final Report. - 2016. – p.48. Hochschule Ulm – Ulm University of Applied Sciences, Germany (HSU). <https://echord.eu/public/wp-content/uploads/2018/01/Final-Report-MARS.pdf>
17. Yang, Q., Du, X., Wang, Z., Meng, Z., Ma, Z., & Zhang, Q. A review of core agricultural robot technologies for crop productions.// Computers and Electronics in Agriculture. – 2023. - Vol. 206. P. 107701. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107701>

Дата надходження статті до видання: 27.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

О.В. Захарчук¹[[0000-0002-9265-4647](#)], О.А. Мікуліч¹[[0000-0003-4522-596X](#)], В.І. Захарчук¹[[0000-0002-5450-391X](#)],
О.С. Приходько¹[[0000-0001-8496-1295](#)], А.С. Кленшин²[[0009-0001-1168-6613](#)]

Луцький національний технічний університет¹

ТФК Луцького національного технічного університету²

ВИБІР СПОСОБУ ЗВАРЮВАННЯ ЧАВУНУ ПРИ РЕМОНТІ ТА ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ

У роботі досліджено особливості зварювання без попереднього підігріву чавуну, що може бути використано при ремонті та відновленні деталей автомобілів. Актуальність теми пов'язана зі складністю зварювання чавуну через його крихкість, схильність до утворення тріщин та формування твердих структур у зоні термічного впливу. Проведено аналіз існуючих способів зварювання чавуну та визначено, що застосування спеціальних електродів і оптимальних режимів дозволяє підвищити якість зварних з'єднань. Експериментальні дослідження виконано на зразках із сірого чавуну, отриманих із випускного колектора двигуна. Зварювання проводили без попереднього підігріву із використанням трьох типів електродів: ЦЧ-4, МНЧ-2 та УТР-8. Для оцінки якості зварних з'єднань застосовано випробування на розтяг на стенді МР-100, при цьому кожен зразок випробовувався п'ять разів із подальшим визначенням середнього значення сили руйнування при розриві. Отримані результати дозволили об'єктивно оцінити механічні властивості зварних з'єднань. Проведено розрахунок міцності стикових зварних з'єднань, який показав, що всі досліджені варіанти відповідають умовам міцності та мають достатній запас надійності. Встановлено, що електрод ЦЧ-4 забезпечує міцний, але відносно крихкий шов, тому його доцільно застосовувати для деталей без динамічних навантажень. Електрод МНЧ-2 є універсальним і забезпечує добрий баланс міцності та пластичності, тоді як УТР-8 формує найбільш пластичний і якісний шов, проте характеризується вищою вартістю. Результати дослідження підтверджують ефективність зварювання чавуну та дозволяють обґрунтовано обирати тип електрода залежно від умов експлуатації деталі та економічної доцільності.

Ключові слова: ремонт автомобілів, відновлення деталей автомобілів, дугове зварювання, зварювальні електроди.

O. Zakharchuk, O. Mikulich, V. Zakharchuk, O. Prykhod'ko, A. Klenshyn

SELECTION OF CAST IRON WELDING METHOD FOR REPAIR AND RESTORATION OF AUTOMOTIVE COMPONENTS

The study investigates the features of cast iron welding without preheating, which can be applied in the repair and restoration of automotive components. The relevance of the topic is determined by the inherent difficulties of welding cast iron due to its brittleness, susceptibility to cracking, and the formation of hard structures in the heat-affected zone. An analysis of existing cast iron welding methods was carried out, demonstrating that the use of specialized electrodes and optimized welding parameters can significantly improve the quality of welded joints. Experimental studies were performed on gray cast iron samples obtained from an engine exhaust manifold. Welding was carried out without preheating using three types of electrodes: TsCh-4, MNCh-2, and UTP-8. The quality of the welded joints was evaluated through tensile testing on an MR-100 testing machine, with each sample tested five times followed by the determination of the average fracture load. The obtained results made it possible to objectively assess the mechanical properties of the welded joints. A strength analysis of butt welded joints was conducted, showing that all investigated variants meet the strength requirements and possess a sufficient safety margin. It was established that the TsCh-4 electrode provides a strong but relatively brittle weld, making it suitable for components not subjected to dynamic loads. The MNCh-2 electrode is versatile and ensures a good balance between strength and ductility, while the UTP-8 electrode produces the most ductile and high-quality weld, although it is characterized by a higher cost. The results of the study confirm the effectiveness of welding of cast iron and allow for a well-founded selection of electrode type depending on operating conditions and economic feasibility.

Keywords: automotive repair, restoration of automotive parts, arc welding, welding electrodes.

Постановка проблеми. Чавун є одним із найпоширеніших конструкційних матеріалів, який широко застосовується в машинобудуванні, зокрема в автомобільній промисловості. Він являє собою залізобуглецевий сплав, що містить понад 2,14 % вуглецю, а також кремній, марганець, сірку та фосфор. Завдяки високим ливарним властивостям, добрій зносостійкості, достатній міцності та здатності поглинати вібрації чавун широко використовують для виготовлення корпусних деталей, блоків циліндрів двигунів, випускних трубопроводів, гальмівних барабанів, картерів та інших елементів автомобілів. Разом з тим чавун характеризується відносно низькою пластичністю та крихкістю, що ускладнює його зварювання і потребує застосування спеціальних технологій під час ремонту та відновлення деталей.

Сферами застосування зварювання чавуну є виправлення дефектів лиття (раковини, недоливи, тріщини, пористість та ін.), ремонт та відновлення дефектів, які отримуються під час експлуатації автомобілів, виготовлення окремих виробів із чавунних заготовок.

Якість зварного з'єднання в чавунних виробах та деталях визначається наступними показниками: легкість обробки зварного шва, однакова твердість шва та основного металу, достатня

міцність зварного з'єднання, однаковий хімічний склад та структура наплавленого та основного металу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час зварювати чавунні деталі можна наступними способами: газове зварювання із застосуванням присадок із чавуну та кольорових металів, аргонодугове зварювання із чавунною присадкою, напівавтоматичне зварювання, дугове зварювання різними типами електродів, газове низькотемпературне зварювання та ін.

Основні ускладнення при зварюванні чавуну пов'язані зі схильністю до утворення твердих загартованих прошарків при швидкому охолодженні та недостатньою пластичністю чавуну, що при зварюванні приводить до утворення тріщин у зв'язку із нерівномірним нагрівом виробу. Крім того, відбувається втрата пластичних властивостей при плавленні та твердінні зварного шва [1-10].

На даний час ведеться пошук шляхів покращення вже існуючих способів зварювання чавуну. У дослідженні [5] представлено огляд різних присадних матеріалів та електродів, що використовуються для зварювання ковкого чавуну за допомогою аргонодугового зварювання та ручного дугового зварювання. Встановлено, що електроди та присадні матеріали, які містять високу концентрацію Ni, мають найкращі показники зварювального шва.

Проводилися оптимізації зварювання сірих чавунів методом напівавтоматичного зварювання різними режимами. Встановлено, що при зварюванні стандартним дротом Св 08А без підігріву мінімальними струмами можна отримати якісні зварні шви [6].

Досліджений спосіб, коли зварювальна дуга горить між вугільним електродом і виробом, а зварювальний дріт подають через отвір у вугільному електроді, який живиться струмом прямої полярності. При цьому вугільний електрод є струмопідводом до зварювального дроту і речовиною, що утворює захисний вуглекислий газ у зварювальній дузі. Під час дослідження зварних швів пор, тріщин та інших дефектів не виявлено [7].

Існують дослідження із застосуванням електродугового зварювання чавуну із використанням сталевих електродів із окисненням надлишкового вуглецю у зоні плавлення гематитом, який попередньо розплавляли вугільною дугою [8]. Також є схожий спосіб із використанням сталевих електродів, а зварювальні кромки заздалегідь оброблялися активним вуглецепоглиначем – негашаним вапном із подальшим нагрівом до 400-600°C [9]. Ці способи зварювання дозволяють видаляти з поверхневого шару чавуну надмірну кількість вуглецю, що приводить до підвищення якості зварного шва і зниження твердості наплавленого металу.

Ще в одному науковому дослідженні розроблені електроди для холодного зварювання чавуну на дроті Св-08А з окисним покриттям. Встановлено, що доцільно зварювати чавунні деталі зі зменшенням сили струму. Це призведе до зменшення науглецювання металу зварного шва [10].

Проведений аналіз літературних джерел показує, що зварювання чавуну залишається складним технологічним процесом через його крихкість, схильність до утворення тріщин та появу твердих структур у зоні термічного впливу. Разом з тим сучасні дослідження свідчать, що застосування спеціальних електродів, присадних матеріалів та оптимальних режимів при зварюванні, дозволяє зменшити науглецювання металу шва та підвищити якість відновлення чавунних деталей.

Таким чином, вибір раціонального способу зварювання є важливим фактором забезпечення надійності та довговічності відремонтованих автомобільних деталей.

Постановка завдань. Мета роботи полягає у дослідженні та виборі раціонального способу зварювання чавуну під час ремонту та відновлення деталей автомобілів, а також у визначенні оптимальних технологічних умов, що забезпечують високу якість зварного з'єднання, підвищення міцності та довговічності відновлених чавунних деталей.

Для досягнення мети в роботі вирішуються наступні завдання: аналіз проблем та перспектив зварювання чавуну при ремонті та відновленні деталей автомобілів; прийняття технічних рішень вибору доцільного способу зварювання чавуну при ремонті та відновленні деталей автомобілів.

Викладення основного матеріалу. Експериментальні дослідження зварювання проводилися на деталі, яка виготовлена із сірого чавуну СЧ 18-36 – випускний колектор двигуна (рис. 1). Із деталі було вирізано дві заготовки для подальших наукових досліджень (рис. 2).

Для проведення зварювання використовувався зварювальний апарат Дніпро-М MIG/MMA-210. Напівавтомат призначений для комбінованої роботи в режимах MIG/MAG (з використанням дроту) та MMA (ручна дугова зварка електродом).

Для зварювання заготовок із сірого чавуну підібрано електроди, які мають різні характеристики зварювання, різну вартість та є доступними для покупки (рис. 3).



Рис. 1. Випускний колектор двигуна автомобіля



Рис. 2. Заготовки вирізані із випускного колектора двигуна автомобіля



Рис. 3. Зварювальні електроди, які використовувалися в експерименті: 1 – ЦЧ-4; 2 – МНЧ-2; 3 – УТР 8

Електрод ЦЧ-4 – спеціальний феритний електрод для ручного дугового зварювання сірого та ковкого чавуну, який широко застосовується під час ремонту корпусних деталей, блоків двигунів, станин та інших чавунних елементів. Наплавлений метал має феритно-перлітну структуру і твердість приблизно 180–220 НВ, що забезпечує задовільну механічну оброблюваність. Основними перевагами електрода є невисока вартість, доступність і можливість зварювання без значного попереднього підігріву, однак шов має меншу пластичність порівняно з нікелевими електродами.

Електрод МНЧ-2 є мідно-нікелевим електродом, призначеним для зварювання та наплавлення сірого, ковкого і високоміцного чавуну, а також для з'єднання чавуну зі сталлю. Наплавлений метал містить значну частку нікелю і міді, що забезпечує високу пластичність шва, твердість близько 160–190 НВ та хорошу механічну оброблюваність. Електрод широко застосовується під час холодного зварювання чавуну, оскільки дозволяє виконувати зварювання без попереднього підігріву або з мінімальним нагріванням.

Електрод УТР 8 – це нікелевий електрод типу Ni-Fe, призначений для ремонту та наплавлення чавунних деталей, зокрема корпусів, блоків двигунів, станин і корпусів насосів. Наплавлений метал характеризується високою міцністю, доброю оброблюваністю та твердістю близько 170–190 НВ, що забезпечує надійність зварного з'єднання. Основними перевагами електрода є висока якість шва, зменшений ризик утворення тріщин і можливість зварювання чавуну без значного попереднього підігріву.

Порівняння електродів для зварювання чавуну наведено у таблиці 1.

Наступним етапом було проведення зварювання заготовок, які виготовлені із сірого чавуну, різними типами електродів (рис. 4). Зварювання виконували без попереднього підігріву деталі. Під час виконання робіт дотримувалися рекомендованих режимів зварювання, зокрема відповідної сили струму, короткої довжини дуги та виконання коротких зварних швів. Також враховували технологічні особливості зварювання чавуну, пов'язані з його крихкістю та схильністю до утворення тріщин, тому між окремими проходами забезпечували поступове охолодження деталі. Це дозволило зменшити внутрішні напруження у металі шва та підвищити якість отриманих зварних з'єднань.

Після зварювання виконують зачистку зварного шва, яка спрямована на видалення шлаку, бризок металу, окалини та інших нерівностей, що утворилися під час зварювання. Ця операція

© О.В. Захарчук, О.А. Мікулич, В.І. Захарчук, О.С. Приходько, А.С. Кленшин

забезпечує кращу якість з'єднання, покращує зовнішній вигляд шва та підготовлює деталь до подальшої обробки.

Табл. 1

Порівняння електродів для зварювання чавуну

Електрод	Основа	Переваги	Недоліки	Вартість, грн/шт
ЦЧ-4	Fe-C-Si	дешевий, простий, доступний	шов крихкий при динамічних навантаженнях, тріщини	20
МНЧ-2	Ni-Cu-Fe	універсальний, добре варить без підігріву	дещо менша міцність шва, ніж у нікелевих	40
УТР 8	Ni-Fe	міцний, пластичний	дорогий	150



а



б



в

Рис. 4. Зразки заготовок, які виготовлені із сірого чавуну зварені різними електродами: а – ЦЧ-4; б – МНЧ-2; в – УТР 8

Для проведення експериментальних досліджень механічних властивостей зразків із сірого чавуну, які зварювалися різними електродами, використовувався випробувальний стенд типу МР-100 (рис. 5). Даний стенд призначений для визначення характеристик міцності матеріалів шляхом випробування зразків на розтяг і стиск. Принцип роботи установки полягає у прикладанні до зразка поступово зростаючого навантаження до моменту його руйнування. Під час випробування реєструються значення прикладеної сили, що дозволяє визначити межу міцності зварного шва. Отримані результати використовуються для оцінювання механічних властивостей досліджуваних зразків та аналізу якості зварних з'єднань.

Зразки встановлювали у захватах машини та навантажували поступово зі збільшенням сили до моменту їх руйнування, при цьому фіксували максимальне значення навантаження (сили руйнування при розриві) (рис. 6).



Рис. 5. Проведення експериментальних досліджень механічних властивостей зразків із сірого чавуну на стенді МР-100



Рис. 6. Один із дослідних зразків після випробувань на розтяг із характером руйнування

Для підвищення достовірності результатів кожен зразок випробовували п'ять разів за однакових умов. Після проведення серії випробувань визначали середнє значення сили розриву, яке використовували для подальшого аналізу міцності зварних з'єднань. Результати випробувань наведено у таблиці 2.

Усі зразки після випробувань на розтяг мають типовий характер руйнування, що свідчить про однаковий механізм розриву матеріалу в зоні зварного з'єднання (рис. 6). Характер руйнування підтверджує відповідність отриманих результатів умовам випробування та дозволяє об'єктивно оцінити механічні властивості досліджених з'єднань.

Табл. 2

Результати випробувань механічних властивостей зразків із сірого чавуну

Електроди	Серії випробувань, кН					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
ЦЧ-4	5200	5250	5300	5150	5100	5200
МНЧ-2	3900	4000	4100	3950	4050	4000
УТР 8	3400	3550	3600	3450	3500	3500

Розрахунок міцності зварних з'єднань є необхідним етапом для оцінки їхньої надійності та працездатності при дії зовнішніх навантажень. Проведені розрахунки дозволяють перевірити відповідність зварного шва умовам міцності та визначити можливість його використання в реальних умовах експлуатації. Це також дає змогу порівняти ефективність різних електродів і обрати оптимальний варіант для відновлення чавунних деталей.

Розрахунок зварних стикових з'єднань при дії поздовжньої сили N , що проходить через центр ваги з'єднання, виконується за формулою [11]:

$$\frac{N \cdot \gamma_n}{t_{min} \cdot l_w \cdot R_{wy} \cdot \gamma_c} \leq 1$$

де N – поздовжня сила, Н;

γ_n – коефіцієнт надійності за навантаженням;

t_{min} – мінімальна товщина деталей, мм;

l_w – довжина зварного шва, мм;

R_{wy} – розрахунковий опір металу шва, МПа;

γ_c – коефіцієнт умови роботи.

Фактичне напруження у зварному шві [11]:

$$\sigma = \frac{N}{A}, \text{ МПа}$$

де A – площа розрахункового перерізу зварного шва, мм².

Під час експериментальних випробувань встановлено, що зварні з'єднання, виконані електродом ЦЧ-4, витримували прикладене навантаження, при цьому руйнування частково відбувалося по основному металу, а не по шву. Це свідчить про високу міцність зварного шва, але разом з тим вказує на його недостатню пластичність. У випадку застосування електродів МНЧ-2 та УТР-8 руйнування відбувалося безпосередньо по зварному шву, що свідчить про більшу пластичність наплавленого металу. Така поведінка з'єднання є більш сприятливою при роботі деталей в умовах змінних та динамічних навантажень.

Стикове зварне з'єднання, виконане електродом ЦЧ-4, при навантаженні 5200 Н задовольняє умову міцності, оскільки розрахунковий показник становить 0,0608 (що є меншим за 1), а фактичне напруження у шві дорівнює 7,90 МПа, що є значно нижчим за допустиме. Для електрода МНЧ-2 при навантаженні 4000 Н отримано значення 0,0415, при цьому напруження у зварному шві становить 8,71 МПа, що також підтверджує забезпечення необхідної міцності. У випадку застосування електрода УТР-8 при навантаженні 3500 Н розрахунковий показник становить 0,0291, а напруження – 6,69 МПа, що свідчить про високий запас міцності з'єднання.

Висновки. Проаналізовано проблеми та перспективи зварювання та відновлення деталей автомобілів, які виготовлені із сірого чавуну.

Проведено електродугове зварювання заготовок із сірого чавуну різними типами спеціальних електродів. Виконано експериментальні дослідження механічних властивостей зразків із сірого чавуну на стенді МР-100.

Розраховано на міцність зварні з'єднання. Експериментальними дослідженнями встановлено, що всі зварні з'єднання, виконані електродами ЦЧ-4, МНЧ-2 та УТР-8, відповідають умові міцності. Електрод ЦЧ-4 доцільно застосовувати для деталей без динамічних навантажень через знижену пластичність зварного шва, МНЧ-2 є універсальним, а УТР-8 забезпечує найбільш пластичний і якісний шов, але є дорожчим.

Список використаних джерел:

1. E.B. Farahani, A. Sarhadi, M. Alizadeh-Sh, S. Fæster, H.K. Danielsen, M.A. Eder Thermomechanical modeling and experimental study of a multi-layer cast iron repair welding for weld-induced crack prediction

Journal of Manufacturing Processes, vol 104, p 443-459. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.08.059

2. Mateichyk V., Ahieiev M., Mościszewski J., Ustincev S., Volodarets M., Kovbasenko S. The use of additive technologies for the restoration and strengthening of parts of transport means. Transportation Research Procedia, 2023, vol. 74, p. 592–599. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.186.

3. Ahieiev M., Gritsuk I., Litikova A., Bilousov I., Vrublevskiy R., Boboshko O., Smyrnov O., Saraieva I., Khudiakov I., Pohorletskiy D. Application of combined electric arc coatings for parts and units of vehicles recovery in Repair Technologies. SAE Technical Paper Series, 2021. DOI: 10.4271/2021-01-5100.

4. Стальніченко О.І. Технологічні можливості відновлення чавунних деталей судових дизелів / О.І. Стальніченко, О.В. Шамов, Є.М. Козішкур // Вісник Одеського національного морського університету, 2023, № 3 (70), С. 58–70.

5. Mphela C., Phasha M., Moema J. Filler materials used to weld ductile cast iron. MATEC Web of Conferences, 2022, 370, 04004 (2022). DOI:10.1051/mateconf/202237004004.

6. Маткова А.В. Особливості зварювання сірих чавунів методом напівавтоматичного зварювання / А.В. Маткова, М.В. Дмитріюк, Н.М. Поліщук // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ», 2011, № 32, С. 224–227.

7. Калін М.А. Спосіб зварювання чавуну / М.А. Калін, А.О. Емдін // Вісник НТУ «ХП», 2013, № 26 (999), С 3–7.

8. Ізотова К.О. Спосіб зварювання чавуну з окисленням надлишкового вуглецю / К.О. Ізотова // Машинобудування, 2016, № 18, С. 89–92.

9. Калін М.А. Спосіб холодного зварювання чавуну / М.А. Калін, К.О. Ізотова // «Сучасні технології промислового комплексу», 2015, Херсон: ХНТУ, С. 141–143.

10. Багров, В. А. Підвищення якості зварних з'єднань чавуну / В. А. Багров, Д. О. Плужніков // Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 24–25 верес. 2020 р. / ХНАДУ – Харків, 2020. – С. 38–43.

11. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зміна № 1. – Київ: Мінрегіон України, 2022. – [Електронний ресурс]: https://uscc.ua/uploads/page/images/normativnye%20dokumenty/dbn/dbn_v_2_6198_zmina1_interactive.pdf.

Дата надходження статті до видання: 14.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

С.Б. Мікуліч^[0009-0003-3287-217X]

Луцький національний технічний університет

СИМУЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ВЗАЄМОДІЇ ЖОРСТКИХ ВКЛЮЧЕНЬ У ПЛАСТИНЧАСТИХ ЕЛЕМЕНТАХ ЗА ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

У роботі представлено симуляційний аналіз та числову реалізацію методики дослідження динамічної взаємодії жорстких включень у нескінченних пластинчастих елементах. Розв'язання задачі базується на сумісному використанні методу граничних інтегральних рівнянь та апарату теорії функцій комплексної змінної, що дозволяє ефективно моделювати зварні з'єднання як жорсткі неоднорідності. Числова реалізація запропонованого підходу здійснювалася із застосуванням методу механічних квадратур та колокації для розв'язання систем сингулярних інтегральних рівнянь. Проведено дослідження впливу геометричних параметрів на розподіл радіальних та кільцевих напружень в околі системи з двох включень. Виконано порівняльний аналіз динамічного напруженого стану для випадків однакової та різної довжини включень при варіації частоти зовнішнього навантаження. Встановлено ефекти взаємного екранування та підсилення локальних полів напружень залежно від топології розташування елементів. Продемонстровано універсальність розробленого підходу для оцінки міцності тонкостінних конструкцій зі складними системами включень.

Ключові слова: концентрація напружень, пластинчасті елементи, жорсткі включення, динамічне навантаження.

S.B. Mikulich

SIMULATION ANALYSIS OF RIGID INCLUSIONS INTERACTION IN PLATE ELEMENTS UNDER DYNAMIC LOADS

The paper presents a simulation analysis and numerical implementation of a methodology for investigating the dynamic interaction of rigid inclusions in infinite plate elements. The problem is solved based on the combined application of the boundary integral equation method and the theory of functions of a complex variable, which allows for effective modeling of welded joints as rigid heterogeneities. The numerical implementation of the proposed approach was carried out using the method of mechanical quadratures and collocation to solve systems of singular integral equations.

A study of the influence of geometric parameters on the distribution of radial and hoop stresses in the vicinity of a system of two inclusions was performed. A comparative analysis of the dynamic stress state for cases of identical and different inclusion lengths under varying frequencies of the external load was conducted. The effects of mutual shielding and reinforcement of local stress fields depending on the topology of the elements' arrangement were established. The versatility of the developed approach for assessing the strength of thin-walled structures with complex inclusion systems is demonstrated.

Keywords: stress concentration, plate elements, rigid inclusions, dynamic loads.

Аналіз актуальності дослідження. Сучасний розвиток машинобудування та будівництва висуває дедалі вищі вимоги до надійності та довговічності тонкостінних пластинчастих елементів, що складають основу критичних конструкцій. Найбільш вразливими ділянками таких елементів традиційно є зони з'єднання деталей, зокрема зварні шви, які докорінно змінюють однорідність силового поля конструкції. Реальні зварні з'єднання характеризуються складною мікроструктурою, наявністю зон термічного впливу та залишковими напруженнями, що робить їх пряме чисельне моделювання надзвичайно ресурсомістким. У зв'язку з цим виникає потреба у розробці аналітично-числових розрахункових моделей, здатних прогнозувати поведінку конструкції від дії різних типів навантаження, особливо, динамічних та імпульсних впливів.

Ефективним підходом до вирішення цієї задачі є перехід від детального опису геометрії шва до його представлення у вигляді жорсткого включення у пружній матриці пластинчастого елемента. Такий підхід до моделювання можна використовувати, оскільки модуль пружності та межа текучості матеріалу шва та прилеглих зон суттєво перевищують аналогічні показники основного металу, створюючи ефект локального "армування". Жорстке включення ідеально відтворює кінематичне обмеження деформацій, яке виникає в реальному зварному вузлі, дозволяючи зосередити увагу на головному чиннику руйнування — концентрації напружень на межі розподілу середовищ.

Особливо важливим є дослідження взаємодії кількох таких включень, оскільки в реальних об'єктах зварні шви часто розташовані близько один до одного, утворюючи складні топологічні системи. Симуляційний аналіз взаємодії цих елементів дає змогу виявити ефекти взаємного підсилення напружень, які неможливо зафіксувати при розгляді поодиноких дефектів чи включень. Використання концепції жорстких включень дозволяє уніфікувати розрахункові схеми для різних типів зварювання, від точкового до переривчастого шва, зводячи їх до чітко визначених граничних задач механіки.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю створення швидких та точних алгоритмів оцінки міцності пластинчастих систем із неоднорідностями. Результати

© С.Б. Мікуліч

симуляційного моделювання можна використовувати для теоретичного обґрунтування оптимізації розташування зварних вузлів з метою мінімізації ризиків крихкого руйнування. Розуміння механізмів перерозподілу зусиль між жорсткими включеннями дозволить значно підвищити експлуатаційну безпеку технічних об'єктів у авіаційній та суднобудівній галузях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Отвори, включення чи підсилення спричиняють значну концентрацію напружень у всіх інженерних конструкціях, що робить оцінку їх величини критично важливою для визначення надійності та термінів експлуатації елементів. Концентрація напружень також наявна у матеріалах зі структурними неоднорідностями, такими як порожнини, домішки та геометричні включення, особливо за дії динамічного чи вібраційного навантаження. Динамічні впливи створюють у таких зонах градієнт напружень, що стає причиною прогресивного накопичення пошкоджень. Розподіл напружено-деформованого стану в околі цих концентраторів значною мірою визначається формою, механічними та геометричними характеристиками включення. Ґрунтовний аналіз таких тіл є основою для розробки методів зниження інтенсивності напружень шляхом ефективного підбору властивостей елементів та їх розташування.

Проблема концентрації напружень поблизу включень залишається високоактуальною в сучасній механіці [1–12]. Історично для задач про кругові включення в нескінченних пластинах за статичного або квазістатичного навантаження існують класичні аналітичні розв'язки у формі рядів, представлені у роботах О. М. Гузя, В. Д. Кубенка та Г. М. Савіна [13, 14]. Однак для включень зі складною геометрією (еліптичної, прямокутної та інших форм) використовуються наближені методи, зокрема метод багатократних відображень [14]. Також для дослідження цього класу задач активно застосовуються напівчислові підходи, такі як метод граничних елементів (МГЕ) [15–17]. Перевагою МГЕ є можливість запису сингулярних та регулярних інтегральних рівнянь для різних типів граничних умов [15, 18, 19].

У сучасних дослідженнях широке застосування мають числові та аналітично-числові методи. Зокрема, метод скінченних елементів (МСЕ) використовується для аналізу напруженого стану пластин із функціонально-градієнтованими кільцевими включеннями [1] та підкріпленими видовженими отворами [2]. Проте, класичний МСЕ часто демонструє високу точність переважно для статичних навантажень.

Крім того, паралельно розвиваються математичні моделі на основі сингулярних інтегральних рівнянь для пластин із лінійними [3, 20] та криволінійними включеннями і тріщинами [4, 21]. Такі підходи дозволяють аналізувати 2D–3D переходи у формі кругових елементів [5] та будувати модифіковані розв'язки Кірша для жорстких або м'яких включень [6, 7]. Перевагою застосування модифікованого методу граничних елементів для дослідження даного класу задач є можливість вивчення напружено-деформованого стану систем із багаточаровими включеннями довільної форми [8, 11]. Цей підхід забезпечує точне визначення всіх компонент напружень на межі розподілу включення – матриця. Ефективність МГЕ та граничних інтегральних рівнянь також підтверджена при дослідженні динамічного напруженого стану пластинчастих елементів із розрізами [9].

Для задач дифракції хвиль у середовищах із включеннями за нестационарних навантажень використання методу граничних елементів дозволяє побудувати інтегральні рівняння у замкненій формі, зокрема, для другої основної задачі [10]. Використання фундаментальних функцій впливу, записаних у аналітичній формі, дозволяє зводити такі задачі до систем сингулярних інтегральних рівнянь, що є ключовим для симуляційного аналізу взаємодії жорстких включень.

Постановка завдання. Аналіз існуючих публікацій свідчить, що попри значні успіхи в розробці числових методів для аналізу напружено-деформованого стану елементів з одиничними включеннями, питання динамічної взаємодії систем жорстких неоднорідностей у тонкостінних елементах залишається розв'язаним лише частково. Більшість класичних моделей обмежуються статичним навантаженням або канонічними формами включень, що не дозволяє повною мірою врахувати специфіку реальних зварних вузлів як складних топологічних систем.

Тому метою даної роботи є розробка алгоритму симуляційного аналізу, який базується на концепції представлення зварних швів як жорстких включень у межах гранично-елементного підходу. Це дозволяє не лише уніфікувати розрахункові схеми для різних типів з'єднань, а й детально дослідити ефекти взаємного підсилення напружень при їх близькому розташуванні. Такий підхід забезпечує високу обчислювальну ефективність при аналізі нестационарних процесів, створюючи теоретичне підґрунтя для оптимізації зварних конструкцій з метою запобігання їх крихкому руйнуванню.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо пластинчастий елемент, що містить систему

жорстких довільно розмішених включень (рис. 1), що є моделями зварних швів. Розглядається випадок, коли на границі пластинчастого елемента та включення відсутні переміщення (рис. 1).

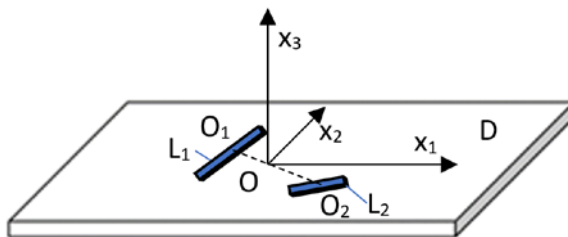


Рис. 1. Модель задачі

Позначимо через L_1 границю контуру одного з включень, а через L_2 - границю контуру іншого включення. Область, яку займає пластинка, позначено через D . Віднесемо пластинчастий елемент до декартової системи координат $Ox_1x_2x_3$, яку розмістимо у середині відрізка O_1O_2 , що з'єднає центри ваги включень (рис. 1). Граничні умови задачі для випадку відсутності переміщень у включеннях відповідно до [13] записуються у вигляді:

$$u_i|_{L_j} = u_i^{(j)} = 0, \quad i, j = 1, 2. \quad (1)$$

Тут $u_1^{(j)}$, $u_2^{(j)}$ – відповідно переміщення точок на границі пластинка-включення в напрямку осей Ox_1 та Ox_2 .

Використаємо запропонований у [9] підхід, адаптувавши його для випадку дослідження двозв'язних областей. Позначимо через L – сумарний граничний контур: $L = \cup_j L_j$. Інтегральне представлення переміщень другої основної задачі запишемо у вигляді [14]:

$$u_i(x_1, x_2) = - \int_L u_j(x_1^0; x_2^0) \cdot P_{ji}^*(x_1; x_2; x_1^0; x_2^0) ds, \quad (2)$$

де P_{kj}^* — фундаментальні функції [9]. Для розглянутого двовимірного випадку значення індексів вибиралися $k, j = 1, 2$.

Використовуючи розроблений у [9] алгоритм, побудуємо для розв'язання задачі систему інтегральних рівнянь. Для цього задовольнимо граничні умови (1) на кожному з граничних контурів, використовуючи інтегральні представлення для переміщень (2). Дослідивши нерегулярність підінтегральних функцій та встановивши їх особливості шляхом виділення нерегулярних складових та використавши формули Племеля-Сохоцького [13, 14] при граничному переході запишемо систему інтегральних рівнянь задачі у матричній формі:

$$C \cdot U + \int_L F \cdot U ds = P, \quad (3)$$

де $C = \{c_{ij}\}$ - матриця позаінтегральних коефіцієнтів, $U = \{u_i^{(k)}\}$ – матриця невідомих переміщень, $P = \{P_{ij}\}$ – матриця впливу заданого навантаження, $F = \{f_{ij}\}$ – матриця фундаментальних функцій.

Для розв'язання системи інтегральних рівнянь (3) використано числовий алгоритм, що ґрунтується на методі механічних квадратур та колокації. При параметризації границі контуру включень L_j використовувалося конформне відображення [14]:

$$t = g(\theta) = a(e^{-i\theta} + a_1 e^{i\theta} + a_2 e^{3i\theta} + a_3 e^{5i\theta} + \dots), \quad 0 < \theta < 2\pi,$$

де сталі a_1, a_2, \dots визначають співвідношення між сторонами прямокутного включення, а стала a впливає на його довжину.

Для визначення напружень на границі матриця - включення використовувалися отримані у [9] залежності у інтегральній формі:

$$\sigma_{ij} = \int_L H_{ik} u_k ds,$$

причому функції H_{ij} є відомими. Розрахунок напружень проводився числово у відповідних точках границь включень.

Числові розрахунки проведені для випадку дослідження впливу «падаючої» хвилі стиску, потенціали якої задаються [13, 14]:

$$\Phi = \Phi_0 e^{i\omega(\tau - \omega_1 x_1)}, \quad \Psi = 0,$$

де ω - частота, $\omega_1 = \frac{\omega}{c_1}$, $\Phi_0 = \frac{\rho}{\omega^2}$, що поширюється у напрямку осі Ox_1 на систему жорстких

включень. 2D модель задачі для випадку колінеарних включень представлено на рис. 2.

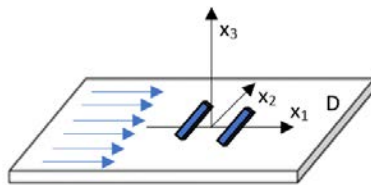


Рис. 2. 2D модель навантаження.

Числові розрахунки проведено для випадку, коли включення мають однакову (рис. 3, зліва) та різні (рис. 3, справа) довжини. При розрахунках враховувалося, що відстань між центрами включень дорівнює довжині більшого з включень.

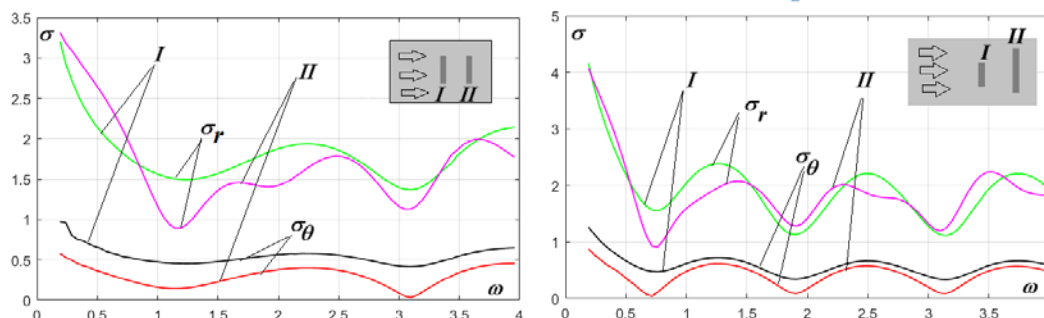


Рис. 3. Напружений стан пластинчастих елементів з системою включень.

Проведені розрахунки дозволили встановити закономірності розподілу компонент напружень σ_r та σ_θ в околі двох жорстких включень залежно від частоти динамічного навантаження ω та геометричної конфігурації системи. На представлених на рис. 3 графіках спостерігається осцилюючий характер зміни напружень, що пояснюється інтерференцією хвиль, відбитих від межі розділу «включення–матриця».

Для випадку включень однакової довжини (рис. 3, зліва) максимальні значення радіальних напружень σ_r фіксуються в області низьких частот, після чого спостерігається їх поступове затухання з вираженими локальними екстремумами. Напруження на першому включенні I, яке першим сприймає хвильовий фронт, є дещо вищими за аналогічні показники на другому включенні II, що свідчить про частковий ефект «екранування».

При дослідженні моделі з включеннями різної довжини (рис. 3, справа) характер взаємодії суттєво змінюється. Зменшення розміру першого включення призводить до зростання амплітуди напружень σ_r на більшому (другому) включенні, що вказує на перерозподіл енергії динамічного впливу в системі. Графіки демонструють, що для випадку системи включень різної довжини екстремуми напружень стають більш гострими, а частотний інтервал між ними скорочується.

Кільцеві напруження σ_θ в обох випадках мають значно меншу амплітуду порівняно з радіальними, проте їх роль у зонах концентрації є важливою для оцінки ризику зсувного руйнування. Порівняльний аналіз показує, що при відстані між центрами, яка дорівнює довжині більшого включення, взаємний вплив елементів залишається інтенсивним, провокуючи ефект підсилення поля напружень у проміжку між ними.

Результати симуляції підтверджують, що зміна геометричних параметрів одного з включень радикально змінює частотний відгук усієї конструкції. Це дозволяє зробити висновок, що при проектуванні зварних вузлів необхідно враховувати не лише їх власну міцність, а й розташування щодо напрямку очікуваного динамічного навантаження. Отримані дані можуть бути використані для визначення критичних частот, при яких концентрація напружень досягає небезпечних значень, що є ключовим для забезпечення надійності пластинчастих елементів у авіа- та суднобудуванні.

Слід відмітити, запропонований у цій роботі підхід характеризується істотно ширшими можливостями розрахунків. Крім того, цей підхід є універсальним для дослідження напруженого стану у випадку включень іншої гладкої форми та не потребує, на відміну від методу рядів, жодних модифікацій. Переваги цього підходу будуть продемонстровані у ряді наступних досліджень.

Висновки

Запропонований у роботі підхід на основі модифікованого методу граничних елементів демонструє значно ширші обчислювальні можливості порівняно з традиційними підходами. Головною перевагою даного методу є його універсальність, оскільки він дозволяє досліджувати напружений стан пластин із включеннями будь-якої гладкої геометрії без необхідності складної математичної модифікації алгоритму, що є обов'язковим для методу розкладу у ряди. Потенціал та ефективність застосування цієї методики для складніших систем будуть детально висвітлені у наших наступних наукових працях.

Список використаних джерел

1. Hart, E. L., Terokhin, B. I. (2021) Computer Simulation of the Stress-Strain State of the Plate with Circular Hole and Functionally Graded Inclusion. *JODEA*, 29(1), 42–53.
2. Hart, E.L., Hudramovich, V.S. (2022) Computer Simulation of the Stress-Strain State of Plates with Reinforced Elongate Rectangular Holes of Various Orientations. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 108, 77–86.
3. Nazarenko, O., Usov, A., Volkova, M., Kozin, O. (2023) Mathematical Modeling of the Stress-Strain State of a Plate with Rigid Linear Inclusion and Mixed Boundary Conditions. *Вісник КрНУ*, 1(138), 22–28.
4. Zelenyak, V., Kolyasa, L., Klapchuk, M., et al. (2021) Determining Patterns in Thermoelastic Interaction between a Crack and a Curvilinear Inclusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7(114), 52–58.
5. Oshri, O., Biswas, S., Balazs, A.C. (2019) Modeling the behavior of inclusions in circular plates undergoing shape changes from two to three dimensions. *Phys. Rev. E*, 100, 043001.
6. Lavrenyuk, V. I., Lavrenyuk, N. V. (2007) The Stress–Strain State of a Plate with a Multilayer Inclusion. *International Applied Mechanics*, 43(3), 329–334.
7. Rana, A.K., Paulb, S.K., Deya, P.P. (2019) Stress field in an isotropic elastic solid containing a circular hard or soft inclusion. *Materials Today: Proceedings*, 11, 657–666.
8. Shvabyuk, V., Sulym, H., Mikulich, O. (2015) Stress State of Plate with Incisions under the Action of Oscillating Concentrated Forces. *Acta Mechanica et Automatica*, 9(3), 140–144.
9. Шваб'юк В.І., Фурс Т.В., Коменда Н.В., Мікуліч С.Б. (2023) Інтегральні рівняння задачі дифракції хвиль у пружних середовищах з включеннями. *Наукові нотатки*, 75, 95–99.
10. Brebbia, C., Telles, J., Wrobel, L. (1984) *Boundary element techniques*. Springer, New York.
11. Krenk, S. (1975) On quadrature formulas for singular integral equations of the first and second kind. *Quarterly of Applied Mathematics*, 33(3), 128–136.
12. Lifanov, I. K. (1996) *Singular Integral Equations and Discrete Vortices*. VSP, Utrecht.
13. Guz, A.N., Kubenko, V.D., Cherevko, M.A. (1978) *Diffraction of Elastic Waves*. Naukova Dumka, Kiev, 307 p.
14. Savin, G. N. (1970) *Stress distribution around holes*. NASA, 1008 p.
15. Katsikadelis, J.T. (2016) *The Boundary Element Method for Engineers and Scientists*. Academic Press, 446 p.
16. Gwinner, J., Stephan, E.P. (2018) *Advanced Boundary Element Methods*. Springer, 652 p.

Дата надходження статті до видання: 14.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

Б.І. Придальний^[0000-0001-8565-5986], Л.М. Самчук^[0000-0003-2516-045X], Н.М. Гулієва^[0000-0001-9282-4880],
В.А. Сичук^[0000-0002-8267-0846]

Луцький національний технічний університет

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ДІАГНОСТИКИ ВІДМОВ, ПРОГНОСТИЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ПОТОЧНОГО МОНІТОРИНГУ

У статті узагальнено сучасні підходи до забезпечення надійності роботизованих і автоматизованих виробничих систем. Розглянуто методи діагностики відмов, прогностичного технічного обслуговування, моніторингу на основі промислового інтернету речей та роль автоматизованої підтримувальної інфраструктури. Запропоновано узагальнену структуру системи забезпечення надійності роботизованого комплексу й подано практичні рекомендації щодо її поетапного впровадження на підприємстві.

Ключові слова: технічний сервіс; роботизовані виробничі системи; системи керування; аналітичне моделювання; мехатронні системи приводів; автоматичне обробне обладнання, проектування елементів обладнання, моніторинг теплофізичних процесів.

B.I. Prydalnyi, L.M. Samchuk, N.M. Hulieva, V.A. Sychuk

IMPROVING THE RELIABILITY OF ROBOTIC MANUFACTURING SYSTEMS BASED ON FAULT DIAGNOSIS, PREDICTIVE MAINTENANCE, AND REAL-TIME MONITORING

The paper considers current approaches to improving the reliability of robotic and automated manufacturing systems based on fault diagnosis, predictive maintenance, real-time condition monitoring, and supporting automated infrastructure. The relevance of the study is determined by the increasing structural and functional complexity of robotic complexes, in which local defects of drives, reducers, bearings, sensors, or auxiliary subsystems may cause unplanned downtime and loss of process stability. The paper generalizes diagnostic, prognostic, and monitoring approaches and proposes a generalized structure of a reliability assurance system for a robotic complex that integrates physical subsystems, data acquisition, local diagnostic processing, IIoT-based data exchange, technical state analytics, and service decision support.

Keywords: technical service; robotic production systems; control systems; analytical modeling; mechatronic drive systems; automatic processing equipment, design of equipment elements, monitoring of thermophysical processes.

Постановка проблеми. Сучасні роботизовані виробничі системи є багатокомпонентними технічними комплексами, у яких взаємодіють механічні, електричні, інформаційні та керувальні підсистеми. За таких умов навіть локальні відхилення технічного стану приводів, редукторів, підшипникових вузлів, сенсорних каналів або допоміжних механізмів можуть спричиняти втрату точності, зниження продуктивності та незаплановані простої.

Традиційне реактивне технічне обслуговування вже не забезпечує потрібного рівня надійності роботизованих комплексів. У зв'язку з цим у сучасному виробництві зростає роль підходів, заснованих на безперервному контролі технічного стану, діагностиці відмов і прогнозуванні деградації вузлів. Найбільш перспективним напрямом є прогностичне технічне обслуговування, за якого рішення щодо сервісного втручання приймаються на основі поточних експлуатаційних даних.

Технічною основою такого підходу є поєднання засобів діагностики відмов, поточного моніторингу параметрів роботи та цифрового передавання даних у межах архітектури промислового інтернету речей. Для роботизованих систем найбільш інформативними є сигнали, пов'язані зі станом приводів, механічних передач, підшипників, систем змащування, а також часові ряди навантаження, швидкості та положення осей. Їх використання дає змогу перейти від фіксації факту несправності до раннього виявлення ознак деградації.

Водночас надійність роботизованого комплексу визначається не лише станом основного виконавчого обладнання, а й роботою допоміжної автоматизованої інфраструктури, зокрема транспортно-накопичувальних і складських підсистем. Тому забезпечення надійності доцільно розглядати як інтегровану задачу, що охоплює діагностику відмов, прогностичне технічне обслуговування, поточний моніторинг та узгоджену роботу допоміжних підсистем.

Для узагальнення переваг і обмежень основних підходів до забезпечення надійності роботизованих систем доцільно використати порівняльну характеристику, наведену в табл. 1.

Такий стан в дослідженнях і застосуванні систем діагностики вказує на доцільність розвитку подальших досліджень.

© Б.І. Придальний, Л.М. Самчук, Н.М. Гулієва, В.А. Сичук

Табл. 1

Порівняльна характеристика підходів до забезпечення надійності роботизованих систем

Група підходів	Основні дані	Переваги	Обмеження	Доцільність використання
Класичні діагностичні методи (порогові, rule-based, signal processing, model-based FDI)	струми, вібрації, температура, сигнали контролерів	простота реалізації, інтерпретованість, придатність для локального рівня	обмежена гнучкість, чутливість до шумів, складність виявлення ранньої деградації	базовий рівень діагностики та поточного контролю
Data-driven методи (ML, DL, CNN, RNN, LSTM, autoencoder)	часові ряди, багатосенсорні дані, історія відмов	виявлення складних нелінійних залежностей, прогнозування відмов	потреба у великих вибірках, обчислювальна складність, нижча пояснюваність	прогнозування деградації та аномалій
ПоТ-моніторинг та цифрові архітектури	сигнали сенсорів, PLC/CNC, мережеві дані	безперервний збір, накопичення історії, інтеграція рівнів керування	вимоги до якості даних, синхронізації, кібербезпеки	технічна основа цифрового супроводу
Підтримувальна автоматизована інфраструктура (AS/RS та ін.)	параметри транспортно-накопичувальних і складських підсистем	стабілізація матеріального потоку, зменшення непродуктивних простоїв	непрямий вплив на діагностику основних вузлів	підвищення загальної стійкості комплексу
Інтегрований підхід	усі перелічені групи даних	найбільш повне забезпечення надійності, зв'язок діагностики і сервісних рішень	вища складність впровадження	найбільш доцільний для сучасного підприємства

У працях [1–3] розглянуто сучасні підходи до діагностики відмов, прогностичного технічного обслуговування та ПоТ-реалізації для промислових роботів, однак основний акцент зроблено або на оглядовому узагальненні методів, або на окремих технічних реалізаціях. У джерелах [5–10] висвітлено загальні засади predictive maintenance, оцінювання технічного стану та залишкового ресурсу, проте без достатньої спеціалізації на роботизованих виробничих системах. Роботи [11–17] присвячені архітектурам збору даних, окремим прогностичним моделям та діагностиці окремих вузлів, але вони переважно зосереджені на часткових аспектах проблеми.

Окрему групу становлять джерела [4, 18–21], у яких висвітлено роль автоматизованої підтримувальної інфраструктури, конструктивно-технологічні особливості оснащення, приводів і механізмів маніпулювання. Ці праці є корисними для обґрунтування системної та механіко-конструкторської природи роботизованого комплексу, але не охоплюють повною мірою сучасні засоби цифрової діагностики, ПоТ-моніторингу та прогностичного технічного супроводу.

Таким чином, наявні дослідження достатньо повно висвітлюють окремо методи діагностики, прогностичного обслуговування, архітектури збору даних і допоміжні підсистеми, однак недостатньо робіт, у яких ці складові були б поєднані в єдину систему забезпечення надійності роботизованого виробничого комплексу. Невирішеною залишається проблема формування узагальненої структури такої системи, яка б інтегрувала діагностику відмов, прогностичне технічне обслуговування, поточний моніторинг та підтримувальну автоматизовану інфраструктуру в межах єдиного технічного підходу.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є узагальнення сучасних підходів до забезпечення надійності роботизованих виробничих систем на основі діагностики відмов, прогностичного технічного обслуговування та поточного моніторингу, а також сформувати узагальнену структуру такої системи для практичного впровадження на підприємстві.

Викладення основного матеріалу. На основі аналізу сучасних підходів до діагностики відмов, прогностичного технічного обслуговування, поточного моніторингу та підтримувальної

© Б.І. Придальний, Л.М. Самчук, Н.М. Гулієва, В.А. Сичук

автоматизованої інфраструктури роботизований комплекс доцільно розглядати як багаторівневу систему забезпечення надійності. У такій системі надійність визначається не лише станом основного виконавчого обладнання, а й узгодженою взаємодією сенсорного середовища, локальних засобів керування, цифрових каналів передавання даних, аналітичних модулів оцінювання технічного стану та допоміжних автоматизованих підсистем.

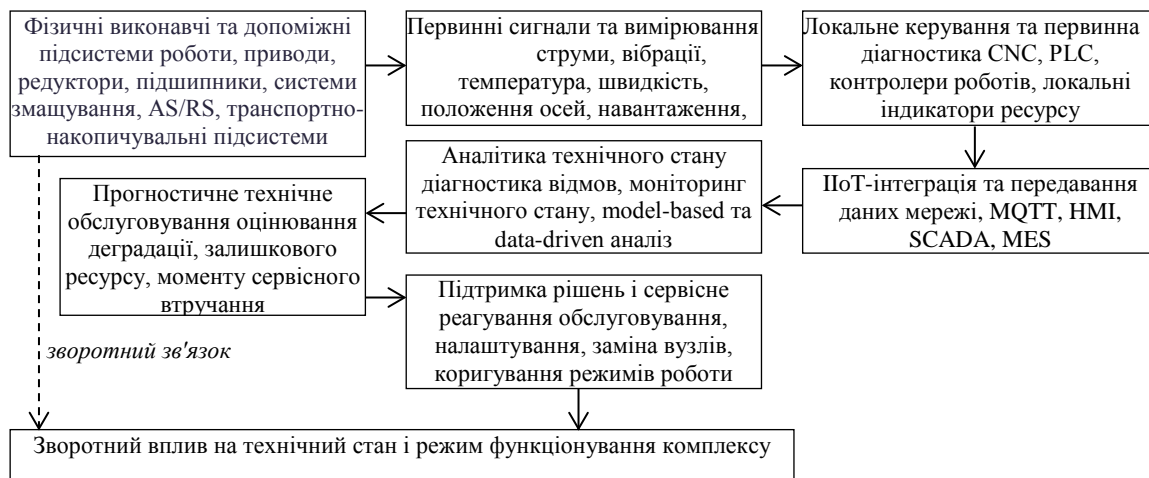


Рис. 1. Узагальнена структура системи забезпечення надійності роботизованого комплексу

Перший рівень структури утворюють фізичні виконавчі та допоміжні підсистеми. До них належать промислові роботи, багатоосьові машини, приводи, редуктори, підшипникові вузли, системи змащування, а також транспортно-накопичувальні й складські підсистеми. Саме на цьому рівні виникають процеси зношування, розрегулювання, перевантаження та інші причини поступової деградації технічного стану. Допоміжна інфраструктура при цьому розглядається як складова загальної надійності комплексу, оскільки порушення матеріального потоку також можуть спричинити непродуктивні простой.

Другий рівень становлять первинні сигнали та вимірювання, які формують інформаційну базу для оцінювання технічного стану. До найбільш інформативних параметрів належать моторні струми, вібрації, температура, швидкість, положення осей, навантаження та тривалість роботи окремих вузлів. Саме ці сигнали дозволяють виявляти ранні ознаки деградації й формувати діагностичні ознаки для подальшого аналізу.

Третій рівень охоплює локальне керування та первинну діагностичну обробку. На цьому рівні функціонують CNC, PLC, контролери роботів та інші засоби автоматизації, які не лише забезпечують технологічне керування, а й можуть виконувати розрахунок локальних індикаторів технічного стану. Доцільність такого підходу полягає у переході від передавання сирих сигналів до формування структурованої діагностичної інформації, придатної для подальшого використання в системі технічного супроводу.

Четвертий рівень становить IoT-інтеграція та передавання даних. На цьому рівні локально сформовані параметри надходять до вищих інформаційних рівнів через промислові мережі та мережеві сервіси обміну, зокрема MQTT. Це забезпечує накопичення історичних даних, віддалений доступ до діагностичної інформації, інтеграцію з HMI, SCADA, MES та формування єдиного цифрового середовища супроводу роботизованого комплексу.

П'ятий рівень утворює аналітика технічного стану, у межах якої реалізуються *fault detection and diagnosis*, *condition monitoring*, *model-based* та *data-driven* методи. На цьому рівні відбуваються виявлення аномалій, інтерпретація відхилень, оцінювання деградації та визначення ознак, які є підставою для прогнозування технічного стану. Фактично саме тут експлуатаційні дані перетворюються на інженерну інформацію про працездатність вузлів і підсистем.

Шостий рівень становить прогностичне технічне обслуговування та підтримка рішень. Його функція полягає у визначенні моменту доцільного сервісного втручання, оцінюванні залишкового ресурсу, формуванні попереджувальних станів і виробленні рекомендацій щодо налаштування, обслуговування або заміни вузлів. Завершальним елементом системи є сервісне реагування, результатом якого стає коригування технічного стану та режимів роботи комплексу.

Таким чином, узагальнена структура системи забезпечення надійності роботизованого комплексу являє собою замкнений контур, у якому фізичний стан обладнання, поточні сигнали, локальна діагностика, цифрове передавання даних, аналітика та сервісні рішення функціонують як взаємопов'язані елементи. За такого підходу *fault diagnosis*, прогностичне технічне обслуговування, ПоТ-моніторинг і підтримувальна автоматизована інфраструктура розглядаються не ізольовано, а як складові єдиної архітектури цифрового технічного супроводу.

Для узагальненого порівняння підходів до забезпечення надійності роботизованих виробничих систем доцільно формалізувати їх за сукупністю критеріїв, які мають безпосереднє практичне значення для промислового впровадження.

З урахуванням аналізу літератури такими критеріями прийнято:

K1 – діагностична інформативність;

K2 – придатність до раннього виявлення деградації;

K3 – інтерпретованість результатів;

K4 – складність впровадження;

K5 – вимоги до обсягу і якості даних;

K6 – придатність до роботи в реальному часі;

K7 – сумісність з архітектурою ПоТ.

Для інтегрального оцінювання підходів введемо узагальнений показник ефективності:

$$Q_j = \sum_{i=1}^7 w_i k_{ij} \quad (1)$$

де Q_j – інтегральна оцінка j -го підходу;

k_{ij} – бальна оцінка j -го підходу за i -м критерієм за шкалою від 1 до 5;

w_i – ваговий коефіцієнт критерію, причому

$$\sum_{i=1}^7 w_i = 1.$$

Для задач забезпечення надійності роботизованих комплексів доцільно надати підвищену вагу критеріям діагностичної інформативності, раннього виявлення деградації та придатності до роботи в реальному часі. У межах даної статті прийнято такі вагові коефіцієнти: $w_1=0,20$, $w_2=0,20$, $w_3=0,10$, $w_4=0,10$, $w_5=0,10$, $w_6=0,15$, $w_7=0,15$.

На основі прийнятої системи критеріїв виконано узагальнене порівняння основних груп підходів, результати якого наведено в табл. 2.

Табл. 2

Порівняльна оцінка підходів до забезпечення надійності роботизованих систем

Підхід	(K1)	(K2)	(K3)	(K4)	(K5)	(K6)	(K7)	(Qj)
Класичні діагностичні методи	3	2	5	4	4	5	4	3,70
Data-driven методи	5	5	2	2	2	3	4	3,70
ПоТ-моніторинг	4	3	4	3	3	5	5	3,95
Підтримувальна автоматизована інфраструктура	3	2	4	3	3	4	4	3,20
Інтегрований підхід	5	5	4	3	3	4	5	4,35

Наведені результати мають узагальнений експертно-аналітичний характер і відображають не точні вимірні значення, а відносну придатність підходів до використання в роботизованих виробничих системах. Із табл. 1 видно, що класичні діагностичні методи зберігають високу цінність завдяки простоті впровадження, високій інтерпретованості та придатності до роботи в реальному часі, однак поступаються за можливістю раннього виявлення слабковираженої деградації. *Data-driven* методи, навпаки, забезпечують найвищу інформативність і прогностичну здатність, проте мають вищі вимоги до даних, складніші в реалізації та менш прозорі з погляду технічного тлумачення результатів.

Окремо слід відзначити ПоТ-моніторинг, який сам по собі не є повноцінним методом діагностики, але формує інформаційну основу для безперервного спостереження за станом комплексу, накопичення історичних рядів і подальшого використання як класичних, так і *data-driven* алгоритмів. Підтримувальна автоматизована інфраструктура, зокрема AS/RS, має нижчу пряму діагностичну інформативність, однак істотно впливає на загальну стійкість функціонування комплексу через забезпечення безперервності матеріального потоку.

Найвищу інтегральну оцінку має інтегрований підхід, який поєднує локальну діагностику, IoT-моніторинг, аналітичні модулі оцінювання технічного стану та підтримку сервісних рішень. Його перевага полягає в тому, що він дозволяє компенсувати слабкі сторони окремих підходів: зберегти інтерпретованість класичних методів, використати прогностичний потенціал *data-driven* моделей та забезпечити цифрову зв'язність усіх рівнів системи через IoT-архітектуру.

Таким чином, формалізоване порівняння показує, що для роботизованих виробничих систем найбільш доцільним є не ізольоване застосування окремого підходу, а побудова інтегрованої системи, у якій класичні діагностичні методи, прогностичні моделі, IoT-моніторинг та допоміжна автоматизована інфраструктура працюють як взаємопов'язані елементи єдиного контуру забезпечення надійності.

Практичне впровадження системи забезпечення надійності роботизованого комплексу доцільно здійснювати поетапно, переходячи від локального контролю окремих параметрів до інтегрованої системи діагностики, прогнозування та підтримки сервісних рішень.

Оцінювання пріоритету моніторингу вузлів. Для практичного впровадження системи забезпечення надійності доцільно формалізувати вибір вузлів, які потребують першочергового моніторингу. З цією метою введемо інтегральний показник пріоритету моніторингу:

$$P_i = w_1 C_i + w_2 D_i + w_3 O_i + w_4 S_i, \quad (2)$$

де P_i – пріоритет моніторингу i -го вузла;

C_i – критичність вузла для працездатності комплексу;

D_i – імовірність або інтенсивність деградації;

O_i – інформативність і доступність параметрів для контролю;

S_i – сервісна значущість наслідків відмови;

w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти критеріїв, причому $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$.

У межах даної статті для узагальненого оцінювання доцільно прийняти такі значення вагових коефіцієнтів: $w_1=0,35, w_2=0,3, w_3=0,2, w_4=0,15$.

Прийнята система ваг відображає пріоритет критичності вузла та інтенсивності його деградації порівняно з іншими критеріями. Кожний показник C_i, D_i, O_i, S_i доцільно оцінювати за п'ятибальною шкалою від 1 до 5, де 1 відповідає мінімальному рівню ознаки, а 5 – максимальному.

За отриманим значенням P_i вузли можна поділити на три групи. При $P_i \geq 4,0$ вузол належить до групи високого пріоритету безперервного моніторингу. При $3,0 \leq P_i < 4,0$ доцільним є періодичний моніторинг із підвищеною увагою до динаміки параметрів. При $P_i < 3,0$ достатнім є звичайний рівень контролю в межах загальної системи технічного супроводу. Запропонований показник дозволяє ранжувати вузли роботизованого комплексу за пріоритетом моніторингу та обґрунтовано формувати перелік параметрів, які доцільно включати до системи поточного контролю технічного стану.

На першому етапі слід визначити найбільш критичні вузли комплексу, відмова яких безпосередньо впливає на точність, продуктивність або безперервність роботи. До них, як правило, належать приводи, редуктори, підшипникові вузли, системи змашування, механічні передачі, а також транспортно-накопичувальні й допоміжні підсистеми.

На другому етапі доцільно обмежити перелік контрольованих параметрів найбільш інформативними сигналами. Для роботизованих систем такими параметрами є моторні струми, вібрації, температура, швидкість, положення осей, навантаження, тривалість роботи сервоприводів і показники споживання ресурсу окремих вузлів. Саме ці дані є найбільш придатними для раннього виявлення деградації.

На третьому етапі рекомендовано починати з простих і технічно інтерпретованих методів діагностики. На практиці це означає використання порогового контролю, аналізу трендів, сигналів струму, часових інтервалів роботи, а також локальних індикаторів зносу чи ресурсу, які можуть бути реалізовані на рівні PLC або CNC. Такий підхід спрощує початкове впровадження і дає результати, зрозумілі для сервісного персоналу.

На четвертому етапі слід забезпечити належну якість даних. Для цього необхідно передбачити перевірку достовірності сигналів, узгодження одиниць вимірювання, синхронізацію часових рядів, фільтрацію шумів і контроль пропущених значень. Без цього навіть правильно обрана архітектура моніторингу не забезпечить надійної діагностики та прогнозування.

На п'ятому етапі доцільно поєднати локальну діагностику з IoT-обміном даними. Локально обчислені індикатори технічного стану повинні передаватися на вищий рівень для накопичення історії, виявлення трендів, порівняння режимів експлуатації та підтримки сервісних рішень. Це є

необхідною умовою переходу від поточного контролю до прогностичного технічного обслуговування.

На шостому етапі, після накопичення достатнього масиву якісних даних, доцільно розширювати систему за рахунок *data-driven* підходів. Їх слід застосовувати не замість класичних методів, а разом із ними, оскільки поєднання інтерпретованих діагностичних ознак і прогнозних моделей є найбільш придатним для реального виробництва.

Окрему увагу слід приділяти допоміжній автоматизованій інфраструктурі. Під час оцінювання надійності роботизованого комплексу необхідно враховувати стан і режим роботи транспортно-накопичувальних та складських підсистем, оскільки порушення їх функціонування може спричинити простої навіть за технічно справного основного обладнання.

Отже, практично доцільною є така послідовність впровадження: визначення критичних вузлів, вибір інформативних параметрів, використання простих локальних індикаторів, забезпечення якості даних, інтеграція з IoT-архітектурою, подальше підключення прогнозних моделей та врахування допоміжної інфраструктури як складової загальної системи забезпечення надійності.

Висновки

У статті узагальнено сучасні підходи до забезпечення надійності роботизованих виробничих систем і показано, що для таких комплексів ключовою умовою підвищення надійності є перехід від реактивного технічного обслуговування до безперервної діагностики відмов, поточного моніторингу технічного стану та прогностичного технічного обслуговування.

Встановлено, що ізолюване застосування окремих підходів має обмежену ефективність: класичні діагностичні методи забезпечують інтерпретованість і простоту впровадження, *data-driven* моделі підвищують здатність до раннього виявлення деградації, а IoT-моніторинг створює інформаційну основу для накопичення та передавання даних, однак лише їх інтегроване поєднання дозволяє сформувати повноцінну систему забезпечення надійності роботизованого комплексу.

Формалізоване порівняння підходів за критеріями діагностичної інформативності, здатності до раннього виявлення деградації, інтерпретованості, складності впровадження, вимог до даних, придатності до роботи в реальному часі та сумісності з IoT-архітектурою показало, що найбільш доцільним для роботизованих виробничих систем є інтегрований підхід, у межах якого локальна діагностика, прогностичні моделі, цифровий моніторинг і підтримувальна автоматизована інфраструктура функціонують як взаємопов'язані елементи єдиного контуру технічного супроводу.

Запропоновано узагальнену структуру системи забезпечення надійності роботизованого комплексу, що охоплює фізичні виконавчі та допоміжні підсистеми, рівень первинного збору сигналів, локальне керування і первинну діагностичну обробку, IoT-інтеграцію, аналітику технічного стану, прогностичне технічне обслуговування та рівень підтримки сервісних рішень. Така структура дозволяє розглядати надійність комплексу як результат узгодженої взаємодії всіх рівнів системи, а не лише як властивість окремих вузлів.

Обґрунтовано, що підтримувальна автоматизована інфраструктура, зокрема транспортно-накопичувальні підсистеми та AS/RS, повинна розглядатися як складова загальної системи забезпечення надійності, оскільки її функціональний стан прямо впливає на безперервність матеріального потоку, ритмічність роботи та стійкість функціонування роботизованого виробничого осередку.

Для практичного впровадження системи забезпечення надійності запропоновано поетапний підхід, який передбачає: виділення критичних вузлів, вибір найбільш інформативних параметрів контролю, використання локальних інтерпретованих індикаторів, забезпечення якості даних, інтеграцію локальної діагностики з IoT-обміном та подальше розширення системи за рахунок прогнозних моделей. Запропонований інтегральний показник пріоритету моніторингу дає змогу ранжувати вузли за доцільністю контролю і формувати технічно обґрунтований склад системи моніторингу.

Отже, підвищення надійності роботизованих виробничих систем доцільно розглядати як комплексну інженерну задачу, що охоплює діагностику відмов, поточний моніторинг, прогностичне технічне обслуговування, цифрову інфраструктуру збору даних і узгоджену роботу допоміжних автоматизованих підсистем, а її розв'язання повинно базуватися на інтегрованому технічному підході.

Список використаних джерел

1. Sabry A.H., Ungku Amirulddin U.A.B. A review on fault detection and diagnosis of industrial robots and multi-axis machines. *Results in Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102397>
2. Achouch M., Dimitrova M., Ziane K., Sattarpanah Karganroudi S., Dhoub R., Ibrahim H., Adda M. On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. P. 8081. <https://doi.org/10.3390/app12168081>
3. Wojtulewicz A., Chaber P. Industrial Robot Control System with a Predictive Maintenance Module Using IIoT Technology. *Sensors*. 2025. Vol. 25. P. 1154. <https://doi.org/10.3390/s25041154>.
4. Edouard A., Sallez Y., Fortineau V., Lamouri S., Berger A. Automated Storage and Retrieval Systems: An Attractive Solution for an Urban Warehouse's Sustainable Development. *Sustainability*. 2022, Vol. 14. P. 9518. <https://doi.org/10.3390/su14159518>.
5. Kaczmarek M.J., Gola A. Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing – An Overview. *IFAC-Papers OnLine*. 2019. Vol. 52, 91–96.
6. Tidden, W., Braaksma J., Tinga T. Exploring predictive maintenance applications in industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2020. Vol. 28. P. 68–85.
7. Li Z., Wang Y., Wang K.-S. Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario. *Advanced Manufacturing*. 2017. Vol. 5. P. 377–387.
8. Vogl G.W., Weiss B.A., Helu M. A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2019. Vol. 30. P. 79–95.
9. Si X.-S., Wang W., Hu C.-H., Zhou D.-H. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data-driven approaches. *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 213. P. 1–14.
10. Huliieva N., Lishchyna N., Pasternak V., Huliieva Z. Development of a system for predicting failures of bagging machines. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2025. Vol. 15(4). P. 10–13. <https://doi.org/10.35784/iapgos.8054>
11. Izagirre U., Andonegui I., Landa-Torres I., Zurutuza U. A practical and synchronized data acquisition network architecture for industrial robot predictive maintenance in manufacturing assembly lines. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 74. P. 102287.
12. Doyel J., Gallege T., Ebru T.B., Dudas C., Skoogh A. A Predictive Maintenance Application for A Robot Cell using LSTM Model. *IFAC-Papers OnLine*. 2022. Vol. 55. P. 115–120.
13. Huliieva N.M., Somov D.O., Pasternak V.V., Samchuk L.M., Chetverzhuk T.I. The selection of boron nitride circles for grinding saponite – titanium composites using non-parametric method. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2020. Vol. 57(6). P. 36-47. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0033>
14. Mourtzis D., Tsubou S., Angelopoulos J. Robotic Cell Reliability Optimization Based on Digital Twin and Predictive Maintenance. *Electronics*. 2023. Vol. 12. P. 1999.
15. Bonci A., Longhi S., Nabissi G., Verdini F. Predictive Maintenance System using motor current signal analysis for Industrial Robot. In: *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2019.
16. Azamfar M., Singh J., Bravo-Imaz I., Lee J. Multisensor data fusion for gearbox fault diagnosis using 2-D convolutional neural network and motor current signature analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106861>.
17. Choudhary A., Goyal D., Shimi S.L., Akula A. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9286-z>.
18. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І., Гао Сінмін. Технологічне оснащення фрезерних верстатів: проектування, теорія, практика: монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2023. 292 с.
19. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Теорія технічних систем в аспектах досліджень та технічної творчості: підручник. Луцьк: Вежа-Друк, 2023. 284 с.
20. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів: монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2016. 352 с.
21. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Проектування цільових механізмів маніпулювання верстатів нового покоління: навчальний посібник. 2-ге вид. Луцьк: Вежа-Друк, 2014. 428 с.

Дата надходження статті до видання: 20.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

В.І. Осипенко^[0000-0002-2166-7766], С.П. Середюк

Черкаський державний технологічний університет

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ ТА
АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ
НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ОПТОВОЛОКОННИМ ЛАЗЕРОМ ПОТУЖНІСТЮ
12 КВТ**

У статті наведено результати експериментального дослідження процесу газолазерного різання низьковуглецевих сталей випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт у середовищі кисню. Встановлено залежності оптимальної потужності лазера та максимальної швидкості різання від товщини листового матеріалу. Отримано аналітичні апроксимаційні залежності та запропоновано узагальнену технологічну модель процесу різання. Проведено енергетичний аналіз і показано зростання енергоефективності процесу зі збільшенням товщини матеріалу. Результати можуть бути використані для прогнозування ефективних технологічних режимів лазерної обробки.

Ключові слова: лазерне різання; оптоволоконний лазер; низьковуглецева сталь; кисневе газолазерне різання; технологічні режими різання; швидкість різання; енергоефективність процесу; математична модель різання.

V.I. Osypenko, S.P. Serediuk

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF EFFICIENT PROCESSING PARAMETERS
AND ANALYTICAL MODELING OF LOW-CARBON STEEL LASER CUTTING WITH A
12 KW FIBER LASER**

The paper presents the results of an experimental study of gas-assisted laser cutting of low-carbon steels using a high-power 12 kW fiber laser in an oxygen environment. The research was carried out on sheet steel of various thicknesses using full factorial experimental planning methods. The relationships between the optimal laser power and the maximum cutting speed as functions of material thickness were determined. Based on the experimental data, analytical approximation dependencies were obtained and a generalized technological model describing the cutting process was proposed. The model links cutting speed with laser power and sheet thickness and demonstrates good agreement with experimental results. In addition, an energy analysis of the process was performed, showing a significant increase in energy efficiency with increasing material thickness due to the contribution of exothermic oxidation and improved heat localization in the cutting channel. The obtained results can be used to predict efficient technological parameters for industrial laser cutting of low-carbon steels.

Keywords: laser cutting; fiber laser; low-carbon steel; oxygen-assisted laser cutting; cutting process parameters; cutting speed; energy efficiency; mathematical model of laser cutting.

Постановка проблеми. Процес лазерного різання низьковуглецевих сталей у середовищі кисню є складним теплофізичним та гідродинамічним процесом, що включає взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом, плавлення металу, хімічну реакцію окиснення та видалення продуктів плавлення струменем асистуючого газу. На першому етапі відбувається поглинання енергії лазерного випромінювання поверхнею металу. Поглинута енергія призводить до швидкого нагрівання матеріалу до температури плавлення та часткового випаровування. Після утворення розплавленої зони струмінь кисню ініціює екзотермічну реакцію окиснення заліза, яка постачає додаткове тепло в зону різання і дозволяє скорочувати витрати лазерної енергії. Виділення додаткової теплоти внаслідок хімічної реакції сприяє підвищенню ефективності процесу різання порівняно з інертними газами та дозволяє збільшити товщину матеріалу, що підлягає обробці. Важливу роль відіграє також гідродинаміка потоку газу. Струмінь кисню виконує дві основні функції: інтенсифікує реакцію окиснення та видаляє розплавлений метал з зони різання. Ефективність видалення розплаву значною мірою визначає якість сформованої кромки. Із збільшенням товщини матеріалу збільшується об'єм розплавленого металу та тепловідвід у масив деталі. Це призводить до необхідності підвищення потужності лазерного випромінювання та зменшення швидкості переміщення ріжучої головки. В останній час в багатьох промислових підприємствах України виникла гостра потреба якісного газолазерного різання сталей великих товщин (15 мм – 25 мм). Відкликаючись на потреби ринку провідний виробник лазерних технологічних установок в Україні компанія «Арамис» започаткувала випуск лінійки установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт. При газолазерному різанні низьковуглецевих сталей за використання в якості асистуючого газу кисню таку потужність економічно доцільно використовувати при різанні сталей товщиною більше 15 мм. Однак в рамках конкретного підприємства часто виникає потреба в різанні на даних потужних установках відносно невеликих товщин (від 2 мм і вище). Визначення ефективних режимів різання у всьому

стандартному діапазоні товщин є складною багатоетапною задачею, вирішення якої вимагає системного комплексу експериментальних досліджень, аналізу отриманих результатів та їх апроксимації математичними функціями, побудови узагальненої математичної моделі процесу. Такий підхід забезпечує досягнення максимальної швидкості різку за заданої якості поверхонь отриманих деталей, що і обумовлює високу економічну ефективність технології за використання оптоволоконних лазерів з максимальною вихідною потужністю 12 кВт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В сучасних технологіях лазерного розкрою низьковуглецевих сталей використання в якості асистуючого газу кисню є широко поширеним і складним застосуванням [1, 2]. Екзотермічна реакція кисню із залізом дає високу швидкість різання для низьковуглецевих сталей та збільшує максимальну товщину різання для конкретної максимальної вихідної потужності оптоволоконного лазера. Це робить економічно привабливим використання кисню для товстих листів, але породжує ряд проблем [3, 4]. Кисень, як асистуючий газ, виконує дві основні функції: видаляє рідкий розплав з зони різання та вносить суттєвий вклад в енергетичний баланс процесу завдяки додатковій теплоті реакції окислення. При зниженому тиску рідкий метал не видалятиметься з необхідною швидкістю. Завищений тиск призводить до зростання теплоти горіння та об'ємів розплавленого металу, який не встигатиме повністю видалятися з зони різання. Ефективність видалення розплаву значною мірою визначає якість сформованої кромки [8]. В роботі [2] показано що вагомий вплив на термічну ефективність горіння має чистота кисню. Із збільшенням товщини матеріалу збільшується об'єм розплавленого металу та тепловідвід у масив деталі. Це призводить до необхідності підвищення потужності лазерного випромінювання та зменшення швидкості переміщення ріжучої головки. На процес кисневого газолазерного різання також суттєво впливають: положення фокусу променю лазера відносно поверхні заготовки; геометричні параметри сопла; висота різання (відслідковуваний зазор); швидкість різання [4, 5]. Поряд зі швидкістю різання якість поверхонь отриманих деталей визначає необхідність подальшої обробки деталей і тим самим безпосередньо впливає на економічну ефективність технології. Критичний огляд публікацій наведений в роботі [8] показав, що найбільш важливими і контрольованими параметрами якості є шорсткість, ширина різку в верхній та нижній площинах заготовки, перпендикулярність (нахил) отриманих поверхонь. Дані параметри повинні жорстко відповідати вимогам стандарту ISO 9013:2017 [4]. Розширений комплекс можливостей обумовлений появою потужних 12 кіловатних лазерів показав необхідність експериментального обґрунтування ефективності використання потужності лазерного променю з точки зору продуктивності процесу та якості отриманих деталей, аналізу та математичної обробки результатів експериментальних досліджень, які можуть бути використані для прогнозування ефективних технологічних режимів лазерної обробки.

Мета статті – експериментальне визначення ефективних режимів лазерного різання листових низьковуглецевих сталей випромінюванням потужного оптоволоконного лазера (12 кВт) у середовищі асистуючого газу – кисню. Встановлення залежності оптимальної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості якісного різання від товщини оброблюваного матеріалу. Отримання аналітичних залежностей та узагальненої технологічної моделі процесу різання, які можуть бути використані для прогнозування технологічних режимів лазерної обробки.

Вклад основного матеріалу.

Обладнання, та методи дослідження. Експерименти виконувалися на серійному верстаті компанії «Арамис», провідного виробника лазерних технологічних установок в Україні. Основні інформація про верстат наведена в таблиці 1.

Табл. 1

Моделі основних систем верстата для проведення досліджень

Верстат	AFX-PRO-12000-1530-LD
Модель лазера, Ø оптоволоконна	MAX Photonics 12 kWt, оптоволоконно 100 мкм
Модель оптичної головки, коліimator	BOCS BLT642, f 200 мм

Оброблялася листовая сталь Ст3сп стандартного ряду товщин (мм) 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 20; 25. Спираючись на матеріали попередніх досліджень авторів [9, 10] в оптичній головці верстата встановлювалися серійні двоканальні сопла компанії Thermaxcut з вихідними діаметрами центрального отвору 1,2 мм; 1,5 мм; 1,8 в залежності від товщини листа. Внутрішня структура та розміри сопла з вихідним діаметром 1,5 мм показана на рис. 1.

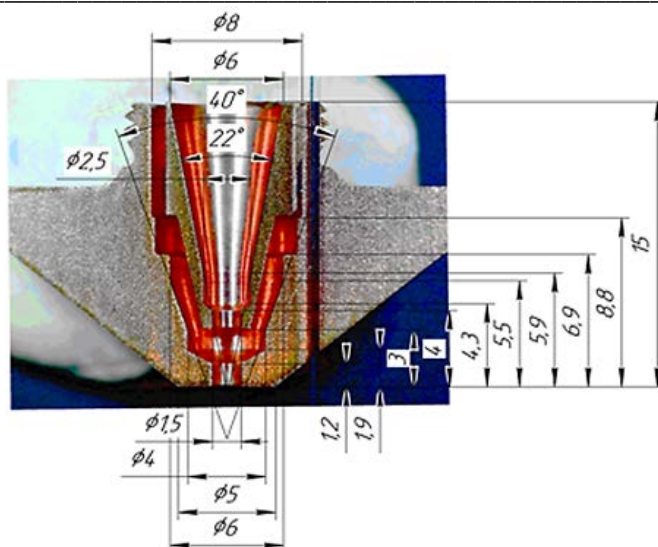
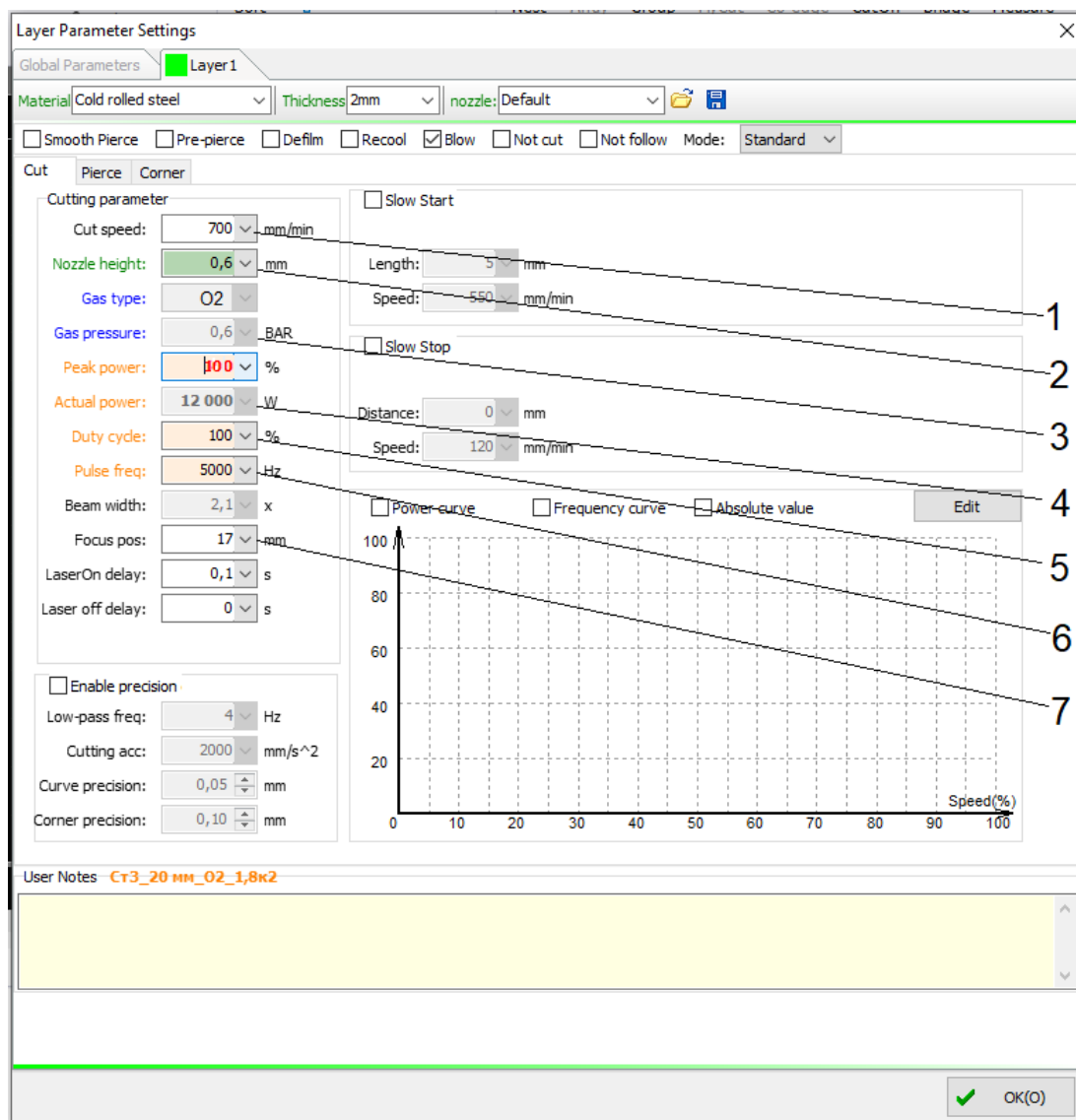


Рис. 1. Внутрішня структура та розміри двоканального сопла з діаметром центрального отвору 1,5 мм компанії Thermacut

Використання двоканальних (двошарових) сопел для газолазерного різання низьковуглецевих сталей зумовлено фізикою процесу окислення металу киснем – це, по суті, кероване горіння. Зовнішній шар газу двоканального сопла допомагає точніше сфокусувати «робочий» кисень у вузьку щілину різі. Це дозволяє отримувати чистий зріз навіть на великих товщинах без зайвого випалювання металу навколо. Окрім того зовнішній кільцевий потік газу виступає фізичним бар'єром. Він «відсікає» навколишнє повітря, не даючи азоту змішуватися з центральним струменем високочистого кисню (атмосферне повітря містить близько 78% азоту. Навіть потрапляння 1–2% азоту в зону різі різко знижує ефективність окислення). Збільшення діаметра сопла при зростанні товщин – це встановлення балансу між фізикою плавлення та гідродинамікою видування металу. Для прорізання металу товщиною 20 мм потрібно окислити (спалити) значно більшу масу заліза, ніж на 5–10 мм. Більший діаметр дозволяє подати великий об'єм газу на низькій швидкості. Це забезпечує стабільне горіння по всій глибині різі (до самого низу плити). Велике сопло дозволяє працювати на мінімальному тиску (0.4–0.8 бар). Газ заповнює різ м'яко, підтримуючи реакцію горіння без зайвого «роздування» факела на поверхні. Як асистуючий газ застосовувався кисень з чистотою 99,97 (рівень чистоти, який в основному використовують замовники верстатів даного типу). Комплекс досліджень виконувався з використанням методів планування повнофакторного експерименту (ППФЕ). Факторний простір включав вихідну потужність лазера (Q – кВт), швидкість різання (F – м/хв), тиск асистуючого газу (P – бар, кисень з чистотою 99,97%), положення фокусу відносно поверхні листа (S – ±мм). Відповідно до паспортних даних оптичної головки в фокальній площині діаметр лазерної плями становив 200 мкм. Контрольований зазор між поверхнею деталі та соплом становив 0,6 мм і залишався незмінним в кожному досліді. Значення факторів на трьох рівнях (нульовий, верхній, нижній) задавалися і контролювалися системою числового програмного керування (ЧПК) верстата з точністю, яка відповідає паспортним даним верстата (рис. 2). Зразки з наявністю ґрат відбраковувалися і не досліджувалися, так як ґрат є очевидною ознакою незадовільного результату досліді. При детальному дослідженні прийнятих зразків, визначалися режими з максимальними швидкостями різання за умови відповідності вимогам стандарту ISO 9013:2017. Відповідно до вимог стандарту у прийнятих зразків контролювалися шорсткість бокових поверхонь (за Ra та Rz), верхня та нижня ширина різі, величина відхилення від перпендикулярності (нахил) поверхні різання. Креслення зразків для досліджень та методики вимірювань ширини різі, шорсткості, відхилення від перпендикулярності наведені в попередній роботі авторів [4].

Результати досліджень.

Основні результати проведеного комплексу експериментальних досліджень, оформлені як технологічні карти параметрів різання низьколегованих сталей в середовищі кисню технологічної інструкції до верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD представлені на рис. 3. Як видно з таблиць у процесі досліджень встановлено залежності оптимальної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості якісного різання від товщини оброблюваного матеріалу.



1 – швидкість різання, мм/хв; 2 – відслідковуваний зазор, мм; 3 – тиск асистуючого газу, Бар; 4 – потужність лазерного променя, Вт; 5 – робочий цикл імпульсу (безперервний чи імпульсний цикл); 6 – робоча частота імпульсів, Гц; 7 – положення фокусу відносно торця сопла, мм.

Рис. 2. Інтерфейс для внесення параметрів різання в програмі Сур CUT на станку AFX-PRO-12000-1530LD

Отримані експериментальні результати були піддані математичній обробці з метою отримання аналітичних залежностей, які можуть бути використані для прогнозування технологічних режимів лазерної обробки (рис. 4, рис. 5). На графіку (рис. 4) представлено залежність оптимальної потужності лазера Q , що забезпечує максимальну швидкість та якість різання, від товщини листа h .

Основні особливості експериментальної залежності:

- при малих товщинах (2–5 мм) потужність майже не змінюється ($\approx 3\text{--}3.6$ кВт);
- при 6–15 мм спостерігається майже лінійне зростання потужності;

при 20–25 мм відбувається насичення потужності (≈ 12 кВт), що пов'язано з обмеженням потужності джерела та інтенсивним зростанням необхідної потужності, що пов'язано зі збільшенням тепловідведення в матеріал та зростанням об'єму металу, який необхідно перевести у рідкий стан. Для опису всієї області товщин найкраще підходить квадратична апроксимація (1).

Як видно з графіка, отримана аналітична залежність (1) добре узгоджується з експериментальними точками та може використовуватися для оцінки оптимальної потужності лазерного випромінювання при різанні низьковуглецевих сталей різної товщини.

Товщина металу, мм	High/Low	Діаметр соплів, мм	Потужність, кВт	Положення фокусу відносно торця соплів	Тиск, бар	Швидкість подачі мм/хв	Ширина різання (верх/низ), мм	Шорсткість поверхні, Rz/Ra	Відхилення від перпендикулярності, мм
2	Low (№4)	1.2	3300	+7	1	4200	0.43/0.51	Rz(S)=4.63...8.7/ Ra(S)=1.98...2	0.04
	High (№6)	1.2	3300	+7	1	5000	0.49/0.53	Rz(S)=8.34...8.93/ Ra(S)=1.91...2.08	0.03
3	Low (№1)	1.2	3300	+8	0.8	3700	0.39/0.51	Rz(S)=4.15...6.24/ Ra(S)=0.8...1.28	0.06
	High (№5)	1.2	3300	+8	0.8	4200	0.37/0.39	Rz(S)=4.8...7.0/ Ra(S)=1.06...1.13	0.01
4	Low (№1)	1.2	3600	+7	0.6	2800	0.55/0.65	Rz(V)=4.46...7.2/ Ra(V)=0.94...1.18	0.05
	High (№5)	1.2	3600	+7	0.6	3200	0.66/0.78	Rz(V)=7.8...12.2/ Ra(V)=0.94...1.18	0.06
5	High (№4)	1.2	3600	+8	0.7	3200	0.34/0.47	Rz(N)=7.48...10.5/ Ra(N)=1.55...2.35	0.07
	High (№6)	1.2	5400	+7.5	0.8	2800	0.48/0.61	Rz(S)=5.5...11.7/ Ra(S)=1.0...1.6	0.07
8	High (№2)	1.2	5400	+7.5	0.8	2300	0.48/0.7	Rz(V)=15...18.6/ Ra(V)=2.43...3.0	0.11
	High (№2)	1.2	6000	+7.5	0.7	2200	0.53/0.81	Rz(S)=25.3...28.3/ Ra(S)=4.72...5.13	0.14
10	High (№2)	1.2	6000	+7.5	0.7	2200	0.53/0.81	Rz(N)=29/ Ra(V)=5	0.14
	High (№2)	1.2	6000	+7.5	0.7	2200	0.53/0.81	Rz(S)=25.6...41.4/ Ra(S)=4.9...7.7	0.14

Товщина металу, мм	High/Low	Діаметр соплів, мм	Потужність, кВт	Положення фокусу відносно торця соплів	Тиск, бар	Швидкість подачі мм/хв	Ширина різання (верх/низ), мм	Шорсткість поверхні, Rz/Ra	Відхилення від перпендикулярності, мм
12	High (№2)	1.2	7500	+8	0.7	1900	0.58/0.9	Rz(V)=42.8...57/ Ra(V)=7...11	0.15
	High (№2)	1.2	7500	+8	0.7	1900	0.58/0.9	Rz(S)=50.7...72.7/ Ra(S)=9.57...16.4	0.15
14	High (№8)	1.4	8500	+8	0.7	1600	0.6/0.8	Rz(N)=53.8...73/ Ra(N)=13.84...19.85	0.14
	High (№8)	1.4	8500	+8	0.7	1600	0.6/0.8	Rz(V)=48...49/ Ra(V)=9.44...9.49	0.14
16	High (№1)	1.8	9500	+8.5	0.7	1500	0.7/1.2	Rz(S)=55.3...54.9/ Ra(S)=9.59...10.88	0.28
	High (№1)	1.8	9500	+8.5	0.7	1500	0.7/1.2	Rz(N)=50.4...57/ Ra(N)=14.44...15.5	0.28
20	High (№2)	1.8	12000	+9	0.7	1300	0.8/0.95	Rz(V)=40...47.1/ Ra(V)=7.98...8.97	0.31
	High (№2)	1.8	12000	+9	0.7	1300	0.8/0.95	Rz(S)=57...40.3/ Ra(S)=6.72...8.57	0.31
25	High (№8)	1.8	12000	+12	0.7	800	0.9/1.5	Rz(N)=43.5...44.2/ Ra(N)=8.54...8.83	0.34
	High (№8)	1.8	12000	+12	0.7	800	0.9/1.5	Rz(V)=42.8...57/ Ra(V)=7...11	0.34

Рис. 3. Технологічна карта параметрів різання сталі ВСтЗсп технологічної інструкції до верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD

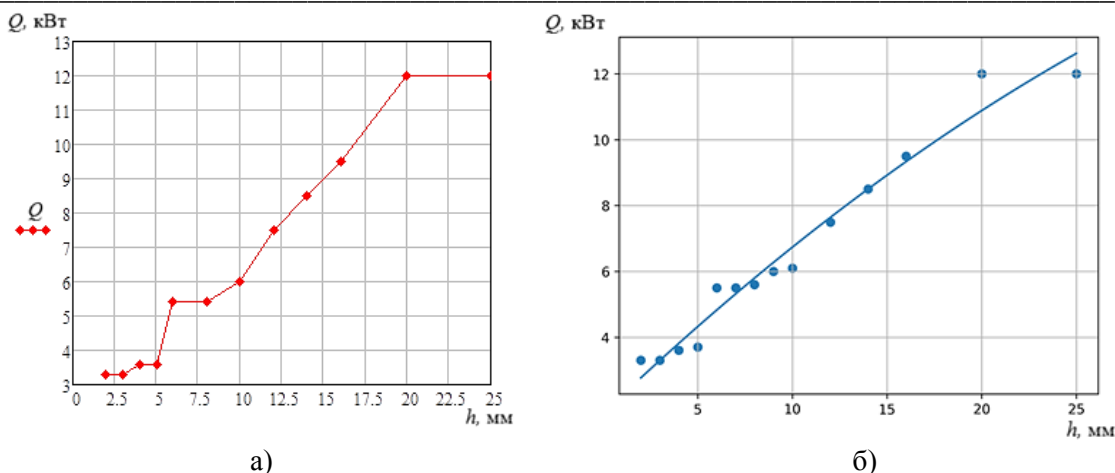


Рис. 4. Залежність величини оптимальної вихідної потужності (Q) оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт, що забезпечує максимальну швидкість різання (F) листової сталі ВСтЗсп за умов отримання параметрів якості, що відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017: а) експериментальні дані; б) отримана в середовищі Mathcad апроксимуюча криві

$$Q(h) = -0,0045h^2 + 0,5500h + 1,638 \quad (1)$$

де $Q(h)$ – оптимальна для даної товщини потужність лазера, кВт;
 h – товщина листа, мм.

Значення коефіцієнту детермінації $R^2 = 0.970$.

На графіку (рис. 5) представлено залежність максимальної швидкості різання від товщини матеріалу, оскільки другим важливим параметром технологічного процесу є максимальна швидкість різання, яка забезпечує отримання якісної кромки без утворення дефектів.

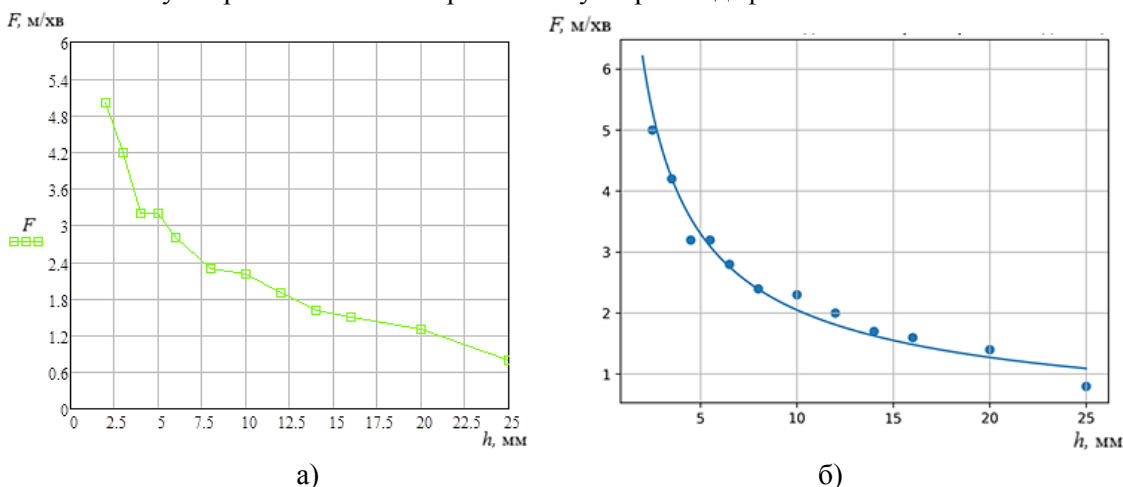


Рис. 5. Залежність максимальної швидкості різання (F) листової сталі ВСтЗсп випромінюванням оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт за використання оптимальної вихідної потужності від товщини листа (h) за умов отримання параметрів якості, що відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017: а) експериментальні дані; б) отримана в середовищі Mathcad апроксимуюча криві

Експериментальна тенденція:

- швидкість різко зменшується при переході від тонких до середніх товщин;
- при великих товщинах зниження стає більш плавним;
- характер кривої відповідає степеневій або гіперболічній залежності.

Найкраща апроксимація отримана степеневою функцією (2)

$$F(h) = 10,006 \cdot h^{-0,688} \quad (2)$$

де $F(h)$ – швидкість різання, м/хв;

h – товщина листа, мм.

Значення коефіцієнту детермінації $R^2 = 0.971$.

Фізична інтерпретація:

1. Зі збільшенням товщини:
 - збільшується об'єм розплаву,
 - погіршується видалення продуктів плавлення киснем,
 - зростає тепловідвід у матеріал.
2. Це призводить до степеневого зниження швидкості різання.

Узагальнена технологічна модель процесу різання. Для узагальненого опису процесу лазерного різання була запропонована технологічна модель, яка пов'язує швидкість різання з потужністю лазерного випромінювання та товщиною матеріалу. Отримана емпірична залежність має вигляд

$$F(Q, h) = 8,693Q^{0,1} \cdot h^{-0,705} \quad (3)$$

Значення коефіцієнту детермінації $R^2 = 0.974$. На рис.6 представлена 3D-поверхня запропонованої технологічної моделі.

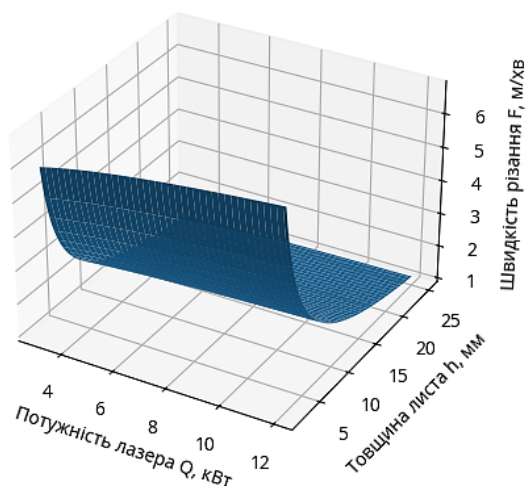


Рис. 6. 3D-модель швидкості лазерного різання $F(Q, h)$

Отримана модель показує:

- плавне зростання швидкості при збільшенні потужності лазера;
- швидке зменшення швидкості при зростанні товщини металу, що відповідає експериментальній фізиці процесу

Невелике значення показника ступені при Q ($a \approx 0,1$) означає, що в дослідженому діапазоні товщин швидкість різання слабо залежить від потужності, оскільки потужність вже близька до оптимальної (1) і процес обмежується гідродинамікою видалення розплаву.

Показник при h ($b \approx -0,705$) свідчить про суттєвий вплив товщини, що добре узгоджується з тепловою теорією балансу різання.

На рис.7 представлені результати перевірки працездатності узагальненої технологічної моделі процесу різання.

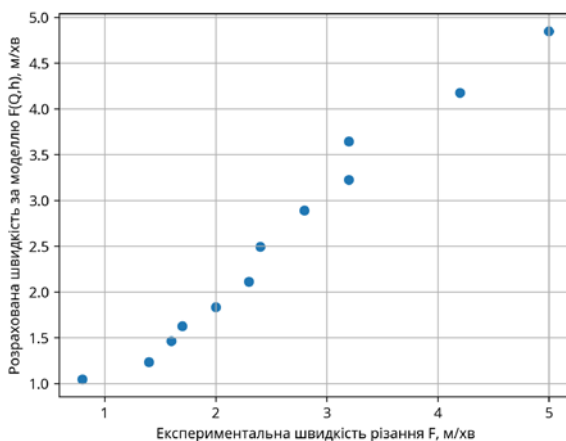


Рис.7. Результати перевірки рівня співпадіння розрахованих за моделлю $F(Q, h)$ та визначених експериментально швидкостей різання

Наведені результати підтверджують задовільну узгодженість розрахункових та експериментальних даних.

Енергетичний аналіз процесу різання. Запропонований енергетичний аналіз базується на співвідношенні між енергією лазера та корисною енергією, що витрачається на нагрів і плавлення металу. Енергоефективність процесу різання оцінювалася за коефіцієнтом корисної дії при використанні енергії лазерного променя, який розраховувався за рівнянням (4).

$$\eta = \frac{\rho \cdot F \cdot b \cdot h \cdot (c \cdot \Delta T + L_m)}{Q} \quad (4)$$

де ρ – густина металу, кг/м³; c – питома теплоємність металу, Дж/кг·град; ΔT – нагрів до температури плавлення, град; L_m – питома теплота плавлення, Дж/кг; b – середня ширина різку, мм; F – швидкість різання, м/с; Q – потужність лазера, Вт.

На рис.8 представлено розраховану за (4) динаміку зміни енергоефективності процесу різання низьковуглецевих сталей в залежності від товщини листа при використанні оптоволоконного лазера з максимальною вихідною потужністю 12 кВт та кисню в якості асистуючого газу.

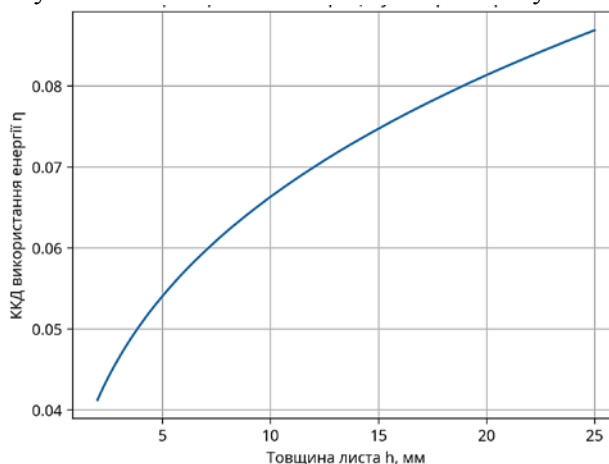


Рис.8. Залежність енергоефективності лазерного різання низьковуглецевих сталей від товщини заготовки

Встановлене стрімке зростання енергоефективності лазерного різання зі збільшенням товщини листа має чітке теплофізичне пояснення зумовлене сукупністю факторів: збільшенням масової продуктивності процесу; зменшенням відносних теплових втрат; зростанням ролі екзотермічного окиснення металу; кращою локалізацією тепла в каналі різку; багаторазовим поглинанням випромінювання в глибокому різі.

Висновки.

1. Проведено комплекс експериментальних досліджень процесу газолазерного різання листової низьковуглецевої сталі ВСт3сп випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт у середовищі кисню із застосуванням методів повнофакторного планування експерименту. Визначено раціональні технологічні режими різання для стандартного ряду товщин листового матеріалу, що забезпечують високу продуктивність процесу та параметри якості різку, які відповідають вимогам стандарту ISO 9013:2017.

2. Встановлено експериментальні залежності оптимальної вихідної потужності лазерного випромінювання та максимальної швидкості якісного різання від товщини оброблюваного матеріалу. Отримані аналітичні апроксимаційні залежності дозволяють здійснювати інженерну оцінку раціональних параметрів технологічного процесу лазерного різання.

3. Запропоновано узагальнену технологічну модель процесу лазерного різання, яка встановлює взаємозв'язок між швидкістю різання, потужністю лазерного випромінювання та товщиною матеріалу. Експериментальна перевірка моделі показала задовільну узгодженість розрахункових та експериментальних результатів, що підтверджує можливість її використання для прогнозування технологічних режимів обробки.

4. Виконано енергетичний аналіз процесу різання, який показав зростання енергоефективності лазерного різання низьковуглецевих сталей зі збільшенням товщини заготовки. Встановлена тенденція пояснюється підвищенням масової продуктивності процесу, зменшенням відносних теплових втрат та зростанням ролі екзотермічної реакції окиснення металу киснем.

5. За результатами проведених досліджень розроблено технологічну карту параметрів газолазерного різання сталі ВСтЗсп для верстатів моделі AFX-PRO-12000-1530-LD, яка може бути використана як практична основа для налаштування режимів різання на промислових лазерних установках.

Список використаних джерел:

1. Badoniya P (2018) CO₂ laser cutting of different materials. A review. Int Res J Eng Technol (February):1–12 [Online]. Available: <http://www.irjet.net>. Accessed 22 Oct 2022.
2. Liu Y, Zhang S, Zhao Y, Ren Z (2022) Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a high-power fiber laser. Opt Laser Technol 154(June):108332. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108332>.
3. Naresh, Khatak P (2022) Laser cutting technique: a literature review. Mater Today Proc 56(5 SI):2484–2489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.250>.
4. В.І. Осипенко. Експериментальне обґрунтування ефективних режимів різання сталей випромінюванням потужного оптоволоконного лазера / В.І. Осипенко, О.П. Плахотний, М.Р. Прусс, С.П. Середюк // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 78/2024 Ст 100-108. DOI 10.36910/775.24153966.2024.78.14.
5. Steen W, Mazumder J (2010) Laser Cutting, Drilling and Piercing. In: Laser Material Processing. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5_4.
6. Bäuerle D (ed) (2013) Laser Processing and Diagnostics: Proceedings of an International Conference, University of Linz, Austria, Vol 39. Springer Science & Business Media, 15–19.
7. Dutta Majumdar J, Manna I (2003) Laser processing of materials. Sadhana 28:495–562. <https://doi.org/10.1007/BF02706446>.
8. Muhammad Alsaadawy, Montasser Dewidar, Ahmed Said, Ibrahim Maher, Taher A. Shehabeldeen (2024) A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2024) 130:1039–1074. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12768-1>.
9. V. I. Osypenko, O. P. Plakhotnyi, S. P. Serediuk, M. R. Pruss, O. V. Timchenko, (2023) The influence patterns of nozzle design and technological parameters of gas-assisted laser cutting on the stagnant pressure of assisting gas. Bulletin of Cherkasy State Technological University, 28/3, 156-167. <http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/288972>
10. В.І. Осипенко. Вплив внутрішньої структури та розмірів типових сопел на поле ріжучого тиску асистуючого газу при газолазерному різанні / В.І. Осипенко, М.Р. Прусс // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 79/2024 Ст 70-78. DOI 10.36910/775.24153966.2024.79.10

Дата надходження статті до видання: 22.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

Р.Г. Редько^[0000-0001-5066-0224], В.С. Пуць^[0000-0003-3164-6173], В.Л. Мартинюк^[0000-0002-6914-2336], О.І. Редько^[0000-0002-3305-6022]*Луцький національний технічний університет***РОЛЬ ТА РОЗВИТОК ІНЖЕНЕРНОЇ ЕТИКИ В УКРАЇНІ**

У статті розглянуто формування, сучасний стан і перспективи розвитку інженерної етики в Україні. Проаналізовано роль освітніх закладів, професійних кодексів та суспільно-історичних подій (зокрема Чорнобиля) у становленні етичної свідомості інженерів. Наведено огляд наявних етичних кодексів в українських інженерних спільнотах, практичні виклики та рекомендації щодо інтеграції етичної підготовки у навчальні програми й корпоративну практику.

Ключові слова: інженерна етика, професійна етика, етична поведінка, професійні кодекси, моральні принципи, безпека людей, техногенні події.

R. Redko, V. Puts, V. Martyniuk, O. Redko**ROLE AND DEVELOPMENT OF ENGINEERING ETHICS IN UKRAINE**

The article examines the formation, current state and prospects for the development of engineering ethics in Ukraine. The role of educational institutions, professional codes and socio-historical events (in particular, Chernobyl) in the formation of the ethical consciousness of engineers is analyzed. An overview of existing ethical codes in Ukrainian engineering communities, practical challenges and recommendations for integrating ethical training into curricula and corporate practice are presented.

Keywords: engineering ethics, professional ethics, ethical behavior, professional codes, moral principles, human safety, man-made events.

Постановка проблеми. Інженерна етика – це розділ професійної етики, що досліджує моральні принципи поведінки інженера у процесі проектування, виробництва, впровадження та експлуатації технічних систем. У сучасному світі, де технологічні рішення безпосередньо впливають на безпеку людей, довкілля й суспільну структуру, роль інженерної етики зростає: від індивідуальних етичних виборів окремого спеціаліста – до формування корпоративної та державної політик у сфері безпеки і сталого розвитку.

Історичні передумови формування інженерної етики в Україні. Виникнення інженерної етики як окремого напрямку співпадає з розвитком індустріального суспільства – тоді зростає відповідальність фахівців за техногенні ризики. В українському контексті особливу роль у формуванні суспільної уваги до етичних аспектів техніки відіграли значні техногенні події, кульмінацією яких стала Чорнобильська катастрофа 1986 року. Чорнобиль не лише спричинив масові гуманітарні й екологічні наслідки; він став каталізатором суспільного переосмислення технологічних ризиків, культури безпеки та відповідальності спеціалістів, у тому числі інженерів. Це вплинуло як на нормативи й процедури, так і на суспільні очікування щодо поведінки технічних фахівців [5].

У наукових і навчальних колах України питання інженерної етики досліджуються і викладаються: є методичні матеріали та курси, які підкреслюють важливість формування етичної культури інженера як частини його професійної підготовки. Зокрема, дослідження та навчальні програми українських технічних університетів акцентують увагу на соціальній відповідальності інженерів та етичних кодексах як елементі підготовки фахівців [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останнє десятиліття дослідження інженерної етики в Україні показали помітну динаміку – від переважно історико-філософських та публіцистичних розвідок до прикладних робіт, що орієнтовані на освіту, професійні стандарти та практичні механізми забезпечення етичної поведінки. Ця трансформація зумовлена як внутрішніми чинниками (науково-освітні ініціативи, досвід техногенних катастроф), так і зовнішніми викликами (гармонізація з міжнародними стандартами, цифровізація) [5]. Розглянемо динаміку розвитку інженерної етики в Україні.

1. Тенденція інтеграції етики в освітні програми. Останні публікації і навчальні плани технічних вишів України свідчать про систематичне включення модулів з інженерної етики, безпеки та соціальної відповідальності до навчальних програм – як окремих дисциплін або міждисциплінарних модулів. Практика передбачає використання кейс-методів, аналізу реальних інцидентів та моделювання кризових ситуацій у навчальному процесі. Це відповідає міжнародним підходам і спрямовано на формування «етичної культури» майбутніх інженерів [6].

2. Акцент на вивченні впливу великих техногенних подій на професійну свідомість. Історико-соціологічні праці щодо Чорнобильської катастрофи та її наслідків для суспільної довіри і культури

© Р.Г. Редько, В.С. Пуць, В.Л. Мартинюк, О.І. Редько

безпеки досі становлять важливу частину української літератури. Ці дослідження підкреслюють, що Чорнобиль став не лише технічною, а й моральною віхою: робить очевидними потребу прозорості, підзвітності та етичних процедур у технічних сферах. Аналіз таких робіт допомагає зрозуміти, як відбувається перетворення колективної пам'яті в академічні й нормативні рішення [5].

3. Прикладні дослідження з фокусом на стандарти і кодекси. У дослідженнях з'являється дедалі більше публікацій, що аналізують існуючі кодекси (національні й адаптовані міжнародні) і пропонують механізми їх впровадження в українському контексті – від корпоративних етичних комітетів до процедур захисту викривачів (whistleblowing). Такі роботи часто рекомендують уніфікацію підходів та адаптацію кращих міжнародних практик до національних реалій [2, 3].

4. Нові напрямки: цифрова етика й вплив технологій. Сучасні публікації дедалі частіше поєднують інженерну етику з темами цифровізації: етика даних, алгоритмічна відповідальність, питання безпеки програмних систем і автоматизації. В умовах стрімкого впровадження ІТ-технологій у виробництво й інфраструктуру це спрямування набуває практичної важливості для підготовки інженерів, які повинні враховувати не лише технічні, а й суспільні й правові наслідки своїх рішень [8].

5. Виклики й прогалини, на які вказують дослідники. Незважаючи на позитивні зрушення, сучасна наукова дискусія щодо інженерної етики в Україні ідентифікує кілька проблем: фрагментарність нормативної бази (відсутність єдиного національного етичного стандарту для інженерів), нерівномірність інтеграції етичних модулів у програми різних вишів, брак практичних кейсів, орієнтованих саме на український контекст, а також складнощі з механізмами контролю та підзвітності у приватних і державних проєктах. Дослідники рекомендують системну політику, міжвідомчу координацію та розробку адаптованих освітніх й корпоративних інструментів [2, 7].

6. Методологічні підходи в дослідженнях. У вітчизняних працях помітна перевага якісних підходів (історичний аналіз, кейс-стаді, інтерв'ю з практиками) поряд з емпіричними дослідженнями освітнього процесу (опитування студентів і викладачів, аналіз навчальних планів). Науковці закликають до більшої кількості міждисциплінарних і експериментальних досліджень (наприклад, контрольовані освітні інтервенції, оцінка ефективності етичних тренінгів) [1, 8].

Сумарні висновки огляду.

- Останні публікації показують поступову, але стійку інтеграцію інженерної етики в академічну й професійну практику України; однак потрібні скоординовані зусилля для уніфікації стандартів і масштабного впровадження практичних методик у навчання й корпоративну культуру.

- Зростає значення тем цифрової етики і взаємозв'язку інженерної професійної відповідальності з питаннями безпеки ПЗ, алгоритмічною прозорістю та охороною даних, що створює поле для нових дослідницьких проєктів.

- Необхідні подальші емпіричні дослідження (особливо оцінка ефективності освітніх інструментів) і міжсекторальна співпраця між університетами, професійними асоціаціями й державою для розробки практичних механізмів забезпечення етичної поведінки інженерів.

Викладення основного матеріалу

Професійні кодекси й організації. В Україні функціонують професійні об'єднання та ініціативи, що розробляють етичні кодекси або адаптують міжнародні стандарти до національного контексту. Приклади – етичні кодекси Міждержавної гільдії інженерів-консультантів та інших галузевих асоціацій, які декларують пріоритет безпеки суспільства й добробуту, професійну компетентність і відмову від конфлікту інтересів. Такі документи базуються на міжнародних зразках (FIDIC, іноземні інженерні товариства), але містять положення з урахуванням національної практики [2].

Розроблення власних кодексів і рекомендацій в Україні є важливим кроком, оскільки створює очікування й стандарти поведінки для інженерних практик у країні. Це також сприяє підвищенню довіри суспільства до професії й визначенню відповідальності у випадках техногенних ризиків.

Освітня складова. Освітні заклади (технічні університети, коледжі) поступово інтегрують теми інженерної етики, соціальної відповідальності та безпеки у навчальні програми. Дослідження підкреслюють необхідність системної підготовки, яка включає не лише теорію, а й практичні кейси, симуляції й аналіз кризових подій. Сучасні публікації і методичні розробки (2020–2024 рр.) наголошують на актуальності включення етичних модулів у підготовку інженерів як засіб профілактики помилок і підвищення культури безпеки [4].

На сьогодні в Україні щодо інженерної етики існують такі виклики й проблемні зони.

1. Фрагментарність нормативної бази. Хоча в Україні є галузеві кодекси та ініціативи, відсутня єдина всеохоплююча національна система етичної регламентації інженерної практики, яка б поєднувала правові норми, професійні стандарти й освітні вимоги.

2. Недостатня інтеграція етики в технічну підготовку. У деяких навчальних програмах етичні модулі формально присутні, але відсутні практичні кейси та методи, що дозволяють студентам опрацьовувати реальні дилеми.

3. Комерційний тиск і конфлікт інтересів. Як і в інших країнах, інженери в Україні іноді стикаються з тиском на скорочення термінів, зниження витрат чи приховування дефектів – це породжує етичні ризики, які вимагають чітких процедур захисту викривачів і підзвітності. На національному рівні лише поодинокі ініціативи забезпечують підтримку етичних практик [4].

Соціальна довіра та комунікація. Після великих катастроф суспільство очікує від інженерів прозорості та відповідальності. Недостатня комунікація про ризики та про заходи безпеки може підривати довіру до професії та технологій загалом. Чорнобильський досвід показує, наскільки значимою є суспільна реакція та потреба у прозорості [5].

Приклади впливу: Чому інженерна етика має значення?

- Техногенні аварії (Чорнобиль та інші) продемонстрували, що технічні помилки, нехтування процедурами або непрозорість можуть призвести до масштабних людських та екологічних втрат; це зробило питання етики та відповідальності центральним у дискусіях про технології [5].

- Поява та застосування етичних кодексів в українських інженерних спільнотах слугує нормативною опорою для прийняття рішень, допомагає уникати конфліктів інтересів і сприяє захисту суспільних інтересів при впровадженні технічних рішень [2].

Рекомендації для подальшого розвитку інженерної етики в Україні.

1. Уніфікація підходів і розробка національного стандарту. Рекомендується розглянути створення національного рамкового документу (рекомендації/кодекс), який би інтегрував національні реалії та міжнародні стандарти (FIDIC, Engineers Europe, IEEE та ін.) і слугував основою для галузевих кодексів.

2. Посилення освітньої складової. Впровадити обов'язкові курси з інженерної етики у всіх інженерних програмах, використовувати кейс-методику, симуляції інцидентів та міждисциплінарні проекти (юридичні, екологічні, соціологічні аспекти). Практичні матеріали та кейси, розроблені українськими університетами, слід адаптувати й розповсюджувати між закладами.

3. Підтримка «етичного голосу» в організаціях. Компанії й державні установи мають впроваджувати процедури повідомлення про порушення (whistleblowing), забезпечувати захист працівників, що повідомляють про ризики, та створювати незалежні етичні комітети для розгляду складних випадків.

4. Міжнародна співпраця. Активно залучати міжнародні інженерні асоціації до обміну практиками й навчальними матеріалами, переводити й адаптувати міжнародні кодекси й курси для українського контексту [7].

Дослідження та моніторинг. Потрібна системна наукова робота з аналізу причин техногенних інцидентів, ефективності етичних тренінгів та застосування кодексів у реальній практиці інженерів в Україні.

Висновки

Інженерна етика в Україні розвивається через поєднання освітніх ініціатив, професійних кодексів та суспільного тиску, посиленого значними техногенними подіями (зокрема Чорнобилем). Сьогодні національні ініціативи вже створюють етичні кодекси й методичні матеріали, але перед країною стоять завдання уніфікації нормативів, посилення освітньої підготовки і створення механізмів забезпечення етичної поведінки в професійній практиці. Реалізація запропонованих заходів сприятиме підвищенню безпеки, якості і суспільної довіри до інженерної професії в Україні.

Список використаних джерел

1. Лапузіна О.М. Формування навичок професійної етики у майбутніх інженерів – методичні матеріали / Нац. техн. ун-т. (КПІ) – репозиторій (<https://surl.li/gdzkmg>).
2. Етичний кодекс Міждержавної гільдії інженерів-консультантів (The Code of Ethics). – МГІК, 2016 (<https://surl.li/yxphyq>).

3. «Кодекс етики інженера-консультанта» – публікація/матеріал (2018) – приклад галузевого кодексу в Україні (<https://surl.li/lhvmsu>).
4. Ковальчук О.С. «Соціальна відповідальність в інженерії» – методичні матеріали НТУУ «КПІ» (<https://surl.li/qrixqf>).
5. Барановська Н. «Чорнобильська трагедія. Нариси з історії» – Київ : Інститут історії України НАН, 2011 (про суспільні й технічні аспекти Чорнобиля) (<https://surl.li/csvdyn>).
6. Мясковська М. «Відповідальність за якість освіти та розвиток професійної етики» (2024) – стаття про роль освітніх закладів (<https://surl.lu/bvkoww>).
7. Engineers Europe – офіційний сайт федерації європейських інженерних асоціацій (про стандарти й ініціативи) (<https://surl.li/tyfjny>).
8. NSPE – National Society of Professional Engineers (етика інженерів, міжнародні практики) (<https://surl.li/hwvufd>).

Дата надходження статті до видання: 23.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

М.Л. Рябчиков^[0000-0002-9382-7562], С.П. Шимчук^[0000-0002-1293-560X], Т.П. Зайчук, С.В. Пилипчук

Луцький національний технічний університет

СИНЕРГЕТИКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ: ФІЛОСОФСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНИХ ПРИНЦИПІВ ВИРОБНИЦТВА

У статті здійснено філософсько-технологічне осмислення синергетичних принципів організації виробничих процесів. Показано, що сучасний етап розвитку промисловості характеризується інтеграцією цифрових, автоматизованих та екологічно орієнтованих технологій, що вимагає пошуку універсальних підходів до моделювання виробництва. Обґрунтовано доцільність застосування синергетики як міждисциплінарної методології, здатної поєднати теоретичні концепції самоорганізації та нелінійної динаміки з інженерними моделями. Виділено універсальні принципи технологічних процесів — різання, формування, температурної обробки та збирання — і доведено їх спільність у різних галузях промисловості. Запропоновано бачення виробничих систем як відкритих, багаторівневих та адаптивних структур, здатних до самовідновлення. Показано стратегічне значення синергетичного підходу для відбудови індустріальної інфраструктури України, зокрема у напрямках гнучкості, стійкості, ресурсоефективності та технологічного суверенітету.

Ключові слова: синергетика, технологічні процеси, виробництво, самоорганізація, моделювання, адаптивність, відбудова промисловості.

M.L. Riabchykov, S.P. Shymchuk, T.P. Zaychuk, S.V. Pylypchuk

SYNERGETICS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES: PHILOSOPHICAL AND TECHNOLOGICAL MODELING OF UNIVERSAL PRINCIPLES OF PRODUCTION

The article presents a philosophical and technological analysis of synergistic principles in the organization of production processes. It is demonstrated that the current stage of industrial development is characterized by the integration of digitalization, automation, and environmentally oriented technologies, which requires the search for universal approaches to production modeling. The feasibility of applying synergetics as an interdisciplinary methodology is substantiated, enabling the combination of theoretical concepts of self-organization and nonlinear dynamics with engineering models. Universal principles of technological processes — cutting, forming, thermal treatment, and assembling — are identified, and their cross-industry similarity is confirmed. Production systems are proposed to be viewed as open, multi-level, and adaptive structures capable of self-recovery. The strategic importance of the synergistic approach for the reconstruction of Ukraine's industrial infrastructure is emphasized, particularly in ensuring flexibility, resilience, resource efficiency, and technological sovereignty.

Keywords: synergetics, technological processes, production, self-organization, modeling, adaptability, industrial reconstruction.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасний етап розвитку виробничих систем характеризується глибокою інтеграцією науково-технічних досягнень, цифровізації, автоматизації та необхідністю екологічно збалансованого використання ресурсів. В умовах глобальних викликів — від енергетичних криз до воєнних руйнувань — особливого значення набуває пошук універсальних принципів організації технологічних процесів, що здатні забезпечити гнучкість, відновлюваність та ефективність виробництва.

Синергетичний підхід, що ґрунтується на ідеї самоорганізації, нелінійності та взаємодії елементів складних систем, відкриває нові можливості для моделювання технологічних процесів як цілісних, адаптивних і здатних до самовідновлення систем. Це особливо актуально для України, яка перебуває у фазі відбудови критичної інфраструктури, промисловості та життєво важливих галузей після масштабних руйнувань. Використання синергетики дозволяє не лише відновити виробництво, а й закласти основи його стійкого, інноваційного та конкурентоспроможного розвитку.

Проблема полягає у відсутності єдиного універсального підходу до моделювання та організації технологічних процесів, здатного враховувати взаємодію технічних, економічних і соціальних факторів у складних виробничих системах. Традиційні методи управління процесами орієнтовані на лінійні моделі та жорстко задані алгоритми, що обмежує можливість швидкої адаптації до непередбачуваних викликів.

Для України ця проблема набуває особливої гостроти у зв'язку з потребою: масштабної реконструкції промислових об'єктів та інфраструктури; створення високотехнологічних виробництв на основі принципів сталого розвитку; забезпечення технологічного суверенітету в умовах глобальної конкуренції та нестабільності.

Таким чином, виникає необхідність у філософсько-технологічному осмисленні синергетичних принципів, що дозволяють будувати універсальні моделі організації виробництва, здатні забезпечити одночасно стабільність і динамічну адаптацію до змін.

Аналіз стану питання. Виділення нерозв'язаних частин проблеми. Теоретичні основи синергетики — полягають у концепціях самоорганізації, біфуркацій, макровпливу «керуючих параметрів» та виникнення порядку в відкритих нелінійних системах (класичні роботи Г. Хакена [1])

© М.Л. Рябчиков, С.П. Шимчук, Т.П. Зайчук, С.В. Пилипчук

та подальші філософські інтерпретації). Ця база формує логічний каркас для перенесення ідей на технічні/виробничі системи.

Існують роботи, що розглядають синергетичний розвиток продукту й процесу в промислових підприємствах, а також побудову «синергетичних систем» інновацій і технологічного оновлення. Вони дають методологічні інструменти, але часто залишаються концептуальними та локальними за застосуванням [2].

Відомі прикладні дослідження в процесному контролі, а також мультимодельні підходи, поєднання різних моделей для управління технологічними процесами (механістичні + дані), дослідження саморегуляції й адаптації в автоматизованих виробничих лініях. Тут помітна тенденція до гібридизації моделей (фізичні моделі + машинне навчання) для підвищення стійкості та продуктивності [3].

Філософсько-методологічні роботи — праці, що зв'язують синергетику з новою «природною філософією» та методологічними підходами в науці, пропонують рамки для інтердисциплінарних досліджень (філософія науки + інженерія). Однак такі роботи інколи відстають від практичних кейсів [4].

Виходячи з аналізу стану питання слід відзначити Сильні сторони існуючих підходів.

Наявна солідна теоретична база (синергетика як міждисциплінарна теорія самоорганізації). [1]. Розвиток гібридних моделей (механістичні + дані) дає практичні інструменти для підвищення точності та адаптивності управління технологічними процесами [5]. Зростаючий практичний попит у відбудові та модернізації в Україні створює політичні/фінансові можливості для реалізації нових методів.

В процесі аналізу стану питання були виділені Нерозв'язані, слабо опрацьовані або суперечливі питання, зокрема відсутність узгодженої філософсько-технологічної рамки, яка поєднувала б синергетичні концепти з інженерними методами проектування виробництва (тобто як перенести абстрактну ідею самоорганізації у конкретні алгоритми та архітектури виробничих систем). Бажано провести масштабування та мульти-рівневе моделювання, при цьому необхідно узгодити поведінку на рівні елементів (агенти, верстати) із макроповедінкою фабрик, кластерів і національних ланцюгів постачання — питання міжскалярної узгодженості залишається відкритим. (практичні кейси — поодинокі). Мало стандартизованих показників (як кількісно виміряти «синергію» в промисловому процесі, технологічну стійкість, здатність до самоорганізації). Нові інформаційно-теоретичні підходи з'являються, але ще не увійшли в практику. Обмежена кількість публікацій, що поєднують синергетику та конкретні сценарії відбудови української промисловості; є запит на дослідження «синергетичних» стратегій реконструкції в умовах обмежених ресурсів і ризиків.

Мета дослідження: розробити філософсько-технологічне моделювання універсальних принципів організації виробництва на основі синергетики, що забезпечує адаптивність, стійкість і можливість масштабної реалізації в умовах реконструкції індустріальної інфраструктури України.

Поєднання теоретичної зрілості синергетики та практичної потреби у гнучких, стійких виробничих рішеннях створює унікальну можливість для впровадження універсальної моделі виробництва. Для України це має стратегічне значення: відбудова — шанс не лише відновити старі потужності, а й запровадити інноваційні, адаптивні та ресурсоефективні виробничі системи, що посилять технологічний суверенітет.

Методологія дослідження. Об'єкт дослідження - Технологічні процеси як складні відкриті системи, що функціонують у виробничому середовищі та підлягають впливу технічних, соціально-економічних та природних чинників. Предмет дослідження - Філософсько-технологічні принципи моделювання та організації виробничих процесів на основі синергетики, спрямовані на досягнення стійкості, адаптивності та універсальності виробництва.

Методологічною основою дослідження можуть бути синергетична парадигма — концепції самоорганізації, біфуркацій, нелінійної динаміки та формування порядку в складних системах, філософія науки та техніки — для осмислення універсальних закономірностей розвитку виробництва й трансляції синергетичних ідей у технологічні моделі, системний підхід — розгляд виробничих процесів як ієрархії взаємопов'язаних рівнів (елемент — підсистема — система — надсистема), інтердисциплінарність — інтеграція методів філософії, інженерії, економіки, управління та соціології.

Методи дослідження включають аналітико-теоретичні методи — аналіз і синтез наукових джерел, узагальнення сучасних підходів до синергетики у виробничих системах, філософське

моделювання — концептуалізація універсальних принципів виробництва у вигляді абстрактних схем і категорій, системне моделювання — використання структурно-функціональних моделей для опису багаторівневої взаємодії у технологічних процесах, порівняльний аналіз — зіставлення традиційних та синергетично орієнтованих підходів до організації виробництва.

Обґрунтування основних універсальних принципів виробництва. Універсальними елементами будь-якого технологічного процесу є операції, що змінюють стан матеріалу чи об'єкта праці. До базових етапів належать:

Різання — механічне відокремлення частини матеріалу для досягнення необхідної форми та розмірів (токарна обробка металу, розкрій тканини, різання тіста у харчовій промисловості).

Формування — надання матеріалу нової конфігурації під дією тиску, деформації або хімічних перетворень (штампування металів, прядіння ниток, формування макаронних виробів).

Температурна дія — зміна властивостей або структури матеріалу під впливом тепла чи холоду (термічна обробка сталі, прасування тканин, випікання хліба).

Збирання — поєднання елементів у цілісний виріб (монтаж деталей машини, пошиття одягу, пакування харчових продуктів).

Кожен із цих етапів є проявом універсального принципу «перетворення матеріалу на форму» і повторюється в різних галузях виробництва.

Рисунок 1 Демонструє можливості використання принципів різання в різних галузях. Зокрема, Рис.1, а демонструє схему різання металу, рис.1,б різання текстильних матеріалів на стрічкових машинах, рис.1,в – різання харчових продуктів. Більшість сучасних принципів різання базується на використанні принципів дії інструмента, як клину, що заглиблюється в матеріал.

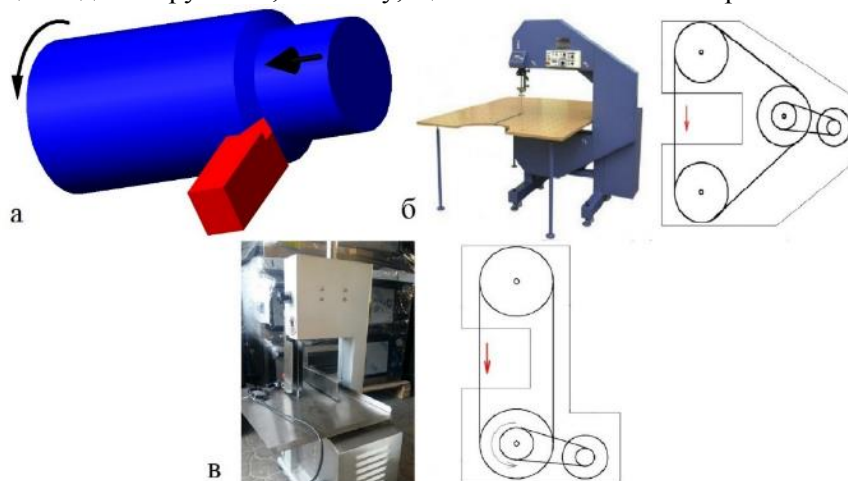


Рис.1. Процеси різання в різних галузях а-металообробка, б – легка промисловість, в – харчова промисловість.

Моделювання процесу різання має подібні підходи у різних галузях. Зокрема, сила різання з врахуванням геометрії клину може бути визначена за рівнянням [6]

$$\frac{F_c}{w} = \tau \cdot t(\cos \varphi + \operatorname{tg}(\varphi + \beta)),$$

де φ — кут площини зрізу (shear plane angle), β — кут тертя на контактi стружка–інструмент ($\beta = \arctan \mu$), t — товщина шару, який зрізається (mm), w — ширина різання (mm), τ — середній зсувний опір на площині зрізу (MPa), F_c — радіальна/горизонтальна сила різання (cutting force),

Загальний підхід до процесу різання в різних галузях підтверджується рядом публікацій [7-9]. Сучасні синергетичні тенденції в процесах різання ведуть до паралельного курсу впровадження автоматизованих ліній для різання (рис.2).

Процеси, направлені на зміну форми, також характерні для різних галузей промисловості. Частіше всього вони зв'язані з переведенням матеріалу, що обробляється, до іншого фізичного стану (пластичного, в'язко текучого або рідкого) з наступним поверненням до пружного становища.

Рис. 3, а демонструє процеси формування в машинобудуванні, рис. 3, б – подібні процеси в легкій промисловості, рис. 3, в – в харчовій галузі.

Підхід до моделювання процесів формування має також загальний підхід і описується рівняннями теорії пластичності.

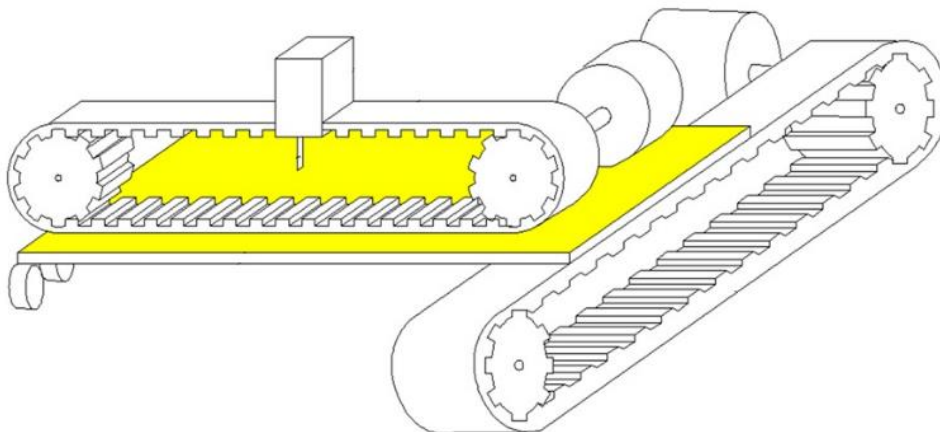


Рис.2. Загальна модель автоматизованого різання в різних галузях

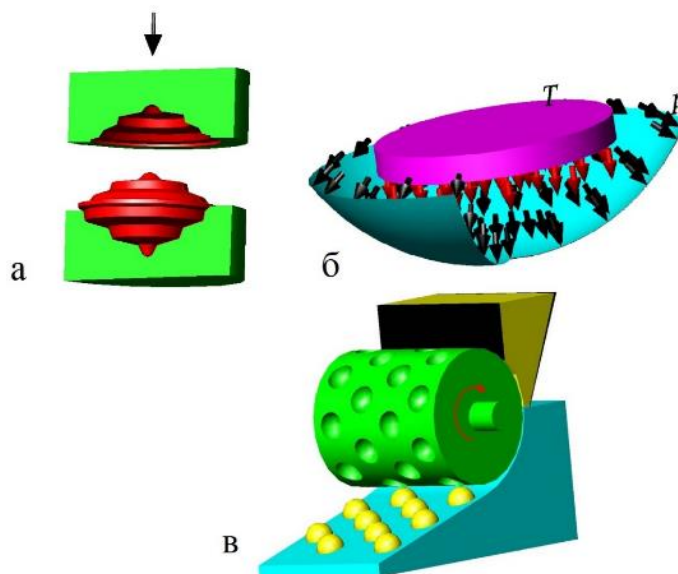


Рис.3. Процеси формування в різних галузях, а-машинобудування, б-легка промисловість, в – харчова промисловість

При цьому рівняння залежності реального напруження σ від реальної деформації ϵ може бути записана у вигляді

$$\sigma = K \epsilon^n$$

де K, n – константи матеріалу.

В процесі штампування / плоского пресування сили формування приблизно можуть бути розраховані, як

$$F \approx \sigma_f A_\Sigma,$$

де σ_f - межа плинності матеріалу,

A_Σ - сумарна площа, що деформується в даний момент (площа контакту матеріалу, який підлягає формуванню).

Для випадку глибокої витяжки класична оцінка для питомої сили має вигляд [10]

$$F \approx \pi \cdot D_a \cdot t \cdot \sigma_f (1 + f(\mu, geom)),$$

де D_a середній діаметр, t товщина, $f(\mu, geom)$ поправка на тертя та на формоутворювальні втрати (може бути виражена через логарифмічні відношення радіусів або число проходів).

Процеси формування в різних галузях мають подібні основи. Для легкої промисловості такі процеси описані, зокрема, в [11-12], для харчової промисловості – в [13-14].

Розвиток процесів формування в більшості галузей відбувається паралельно і передбачає активне впровадження 3D принтерів [14-15], рис.4.

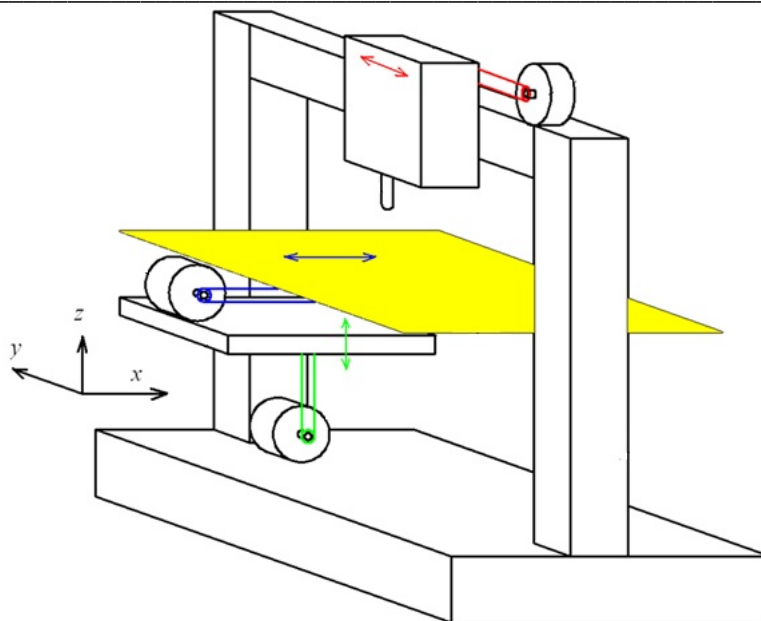


Рис.4. Загальна модель автоматизованого формування в різних галузях

Обробка матеріалів температурною дією також є типовим процесом у більшості галузей (Рис.5). До таких процесів відноситься, зокрема, термообробка металів [16], волого-теплова обробки текстильних матеріалів і виробів [17], теплова обробки при приготуванні і зберіганні їжі [17]

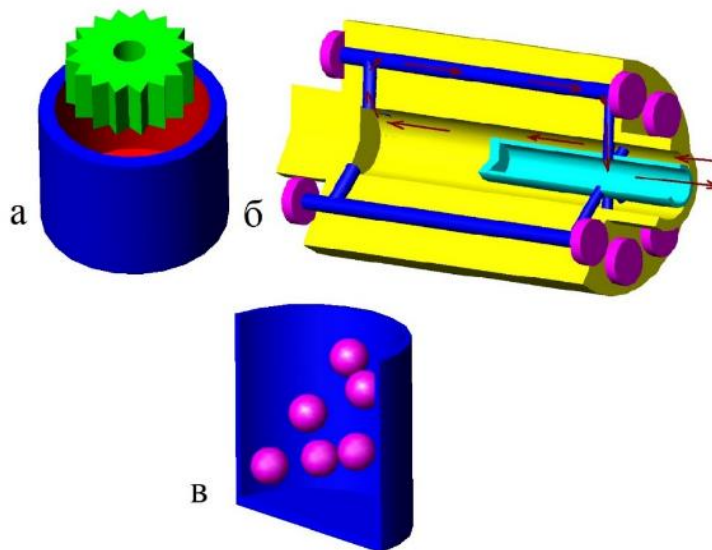


Рис.5. Теплові процеси в різних галузях промисловості а-машинобудування, б-легка промисловість, в – харчова промисловість

Моделювання процесів теплової обробки відбувається за допомогою аналітичних або чисельних методів. До аналітичних методів моделювання можна віднести рішення рівняння теплопровідності для простих форм, методи Фур'є – розкладання температурних полів у ряди, методи інтегральних перетворень. Чисельні методи використовуються для складних деталей та реальних умов обробки. При цьому найбільш розповсюдженими є метод скінченних різниць та метод скінченних елементів [19].

Сучасні універсальні автоматизовані рішення для процесів теплової обробки мають спільну тенденцію і структуру (рис.6).

Процеси складання і збирання також можуть бути розглянуті, як спільні для різних галузей виробництва.

У машинобудуванні збирання є завершальною стадією виготовлення виробу, коли окремі деталі та вузли поєднуються в єдину конструкцію [20-21].

У легкій промисловості (швейне, взуттєве виробництво) збирання має інший характер – це поєднання окремих текстильних, шкіряних чи синтетичних елементів у готовий виріб [22-23]. У харчовій промисловості під збиранням часто мається на увазі формування готових продуктів із напівфабрикатів або компонентів [24-25].

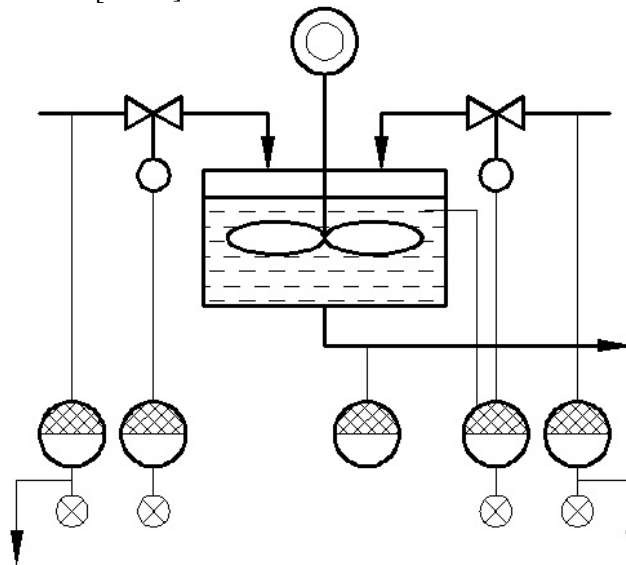


Рис.6. Універсальні технологічні рішення процесів теплової обробки

На рис.7 показані типові підходи до збирання в різних галузях. Зокрема Рис.7,а демонструє процеси збирання в стапелях, зокрема в авіаційному виробництві, рис.7.б – швейне обладнання для збирання деталей в легкій промисловості, рис.7,в – автоматизовану лінію по збиранню вареників.

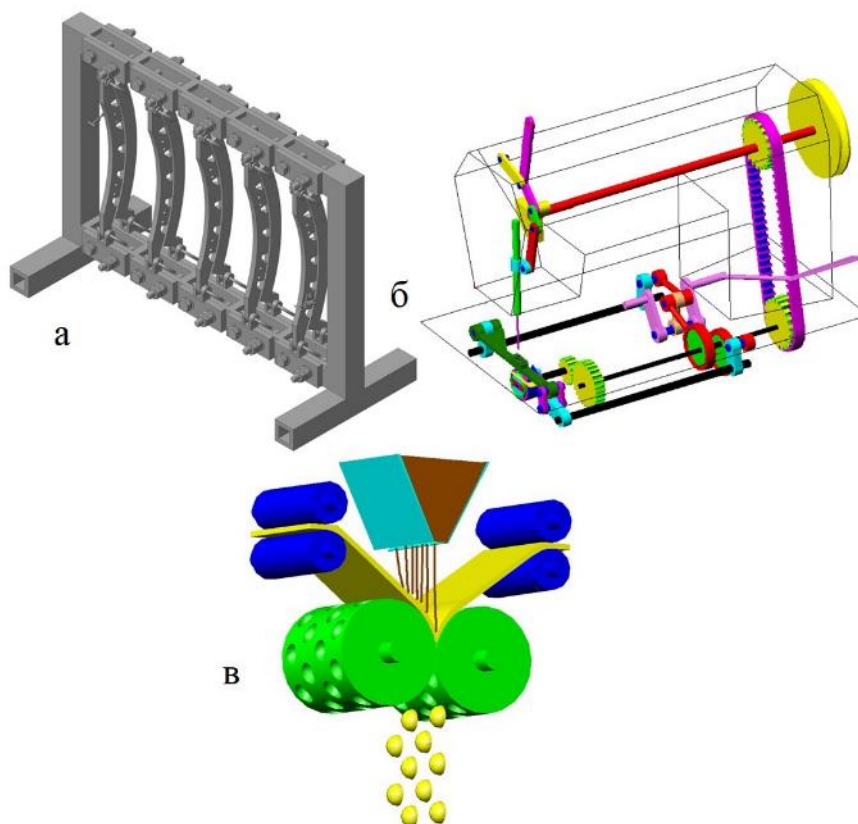


Рис.7. Процеси збирання в різних галузях а-машинобудування, б-легка промисловість, в – харчова промисловість

Отже: у машинобудуванні збирання – це точне поєднання механічних вузлів. у легкій промисловості – це технологічне поєднання деталей з тканин і шкіри, у харчовій – це формування готового продукту та його пакування. Порівняння напрямків збирання в різних галузях наведено в таблиці 1.

Табл. 1

Порівняння підходів до збирання у різних галузях

Галузь	Основні етапи збирання	Методи та обладнання	Особливості
Машинобудування	- Підготовка деталей - Складання вузлів - Загальне збирання - Регулювання і випробування	Ручне, механізоване, автоматизоване, конвеєри, складальні стенди	Висока точність, контроль зазору і сумісності, випробування працездатності
Легка промисловість	- Розкрій матеріалу - Попереднє з'єднання - Основне зшивання/склеювання - Фінальне збирання - Оздоблення	Швейні машини, клеєві преси, в'язальні автомати	Велика кількість дрібних деталей, акцент на естетиці й ергономіці виробу
Харчова промисловість	- Дозування і підготовка інгредієнтів - Формування продукту - Пакування - Контроль якості	Автоматизовані лінії, фасувальне й пакувальне обладнання	Високі вимоги до стерильності, швидкості, безпеки, контроль герметичності тари

Основною вимогою до процесів збирання є забезпечення взаємозамінності окремих елементів, що вимагає використання або створення в окремих галузях системи допусків, посадок і побудови розмірних ланцюгів.

Автоматизація і сучасні підходи демонструють загальні напрямки розвитку процесів збирання у різних галузях у вигляді роботизації виробництва [25]. Таким чином, можна стверджувати, що більшість галузей промисловості мають спільні підходи до виробництва, що дозволяє розробляти синергетичні оптимізаційні схеми з використанням досягнень в суміжних галузях.

Висновки. У ході дослідження було показано, що синергетичний підхід відкриває нові можливості для осмислення та організації технологічних процесів як цілісних систем, здатних до самоорганізації, адаптації та відновлення. Узагальнення універсальних принципів виробництва (різання, формування, температурна дія, збирання) дозволило встановити їх спільність для різних галузей промисловості, що підтверджує наявність єдиних закономірностей трансформації матеріалу у форму незалежно від сфери застосування.

Аналіз традиційних і синергетично орієнтованих моделей показав, що сучасні тенденції розвитку виробництва пов'язані з:

- переходом від лінійних до нелінійних і гібридних моделей управління процесами;
- інтеграцією методів філософії, інженерії та інформаційних технологій;
- масштабуванням процесів від рівня окремої операції до рівня виробничих кластерів і національних ланцюгів постачання;
- універсалізацією підходів до автоматизації та роботизації в різних галузях.

Особливого значення ці результати набувають для України, яка перебуває у фазі відбудови індустріальної інфраструктури. Синергетичне моделювання дозволяє не лише відновлювати виробничі потужності, але й формувати нову філософію промисловості — гнучкої, стійкої, ресурсоефективної та конкурентоспроможної.

Таким чином, синергетика технологічних процесів виступає методологічною основою для створення універсальної моделі організації виробництва, що поєднує стабільність і адаптивність. Її практичне застосування може стати стратегічним інструментом у забезпеченні технологічного суверенітету України та розвитку промисловості майбутнього.

Список використаних джерел

1. Haken H. Visions of synergetics // Journal of the Franklin Institute.-Vol.- 334.- Issues 5–6.- 1997. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(97\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(97)00032-X).

2. Ke-xin B., De-hua S., Ren-feng Z., Bai-zhou L. The Construction of Synergetic Development System of Product Innovation and Process Innovation in Manufacturing Enterprises.// *2006 International Conference on Management Science and Engineering*.- Lille, France -2006.-628-636. <https://doi.org/10.1109/ICMSE.2006.314020>.
3. Beregi R., Szaller Á., Kádár B. Synergy of multi-modelling for process control// *IFAC-PapersOnLine*.-2018.-Vol.51.-Issue 11.- 1023-1028. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.473>.
4. Skakun I. Philosophical and methodological prospects for the future of synergetics in the scientific picture of the world. *Futurity// Philosophy*.-2022.- Vol.1.- No. 4. <https://doi.org/10.57125/FP.2022.12.30.04>
5. Ellis J.L., Jacobs M., Dijkstra J., van Laar H., Cant J.P., Tulpan D., Ferguson N. Review: Synergy between mechanistic modelling and data-driven models for modern animal production systems in the era of big data//*Animal*.-2020.-Vol.14.-Supplement 2.-s223-s237. <https://doi.org/10.1017/S1751731120000312>.
6. Molinari A., Moufki A. The Merchant's model of orthogonal cutting revisited: A new insight into the modeling of chip formation// *International Journal of Mechanical Sciences*.-2008.-Vol. 50.- Iss.2,-124-131. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.07.015>.
7. Li B., Wang X., Hu Y. Li C.. Analytical prediction of cutting forces in orthogonal cutting using unequal division shear-zone model.// *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.- 2011.- 54.- 431–443. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2940-8>.
8. Hainan Z., Shen Z., Cao Z., Hou D., Jiang T. Ye X. Evaluation and Characterization of Ultrasonic Cutting of Monofilament Nylon//*Coatings*.- 2024.-14.- No. 4.- 462. <https://doi.org/10.3390/coatings14040462>.
9. King M.J. Slicing frozen meat with an oscillating knife.//*Meat Sci*.-1999.- 51(3).-261-269. [https://doi.org/10.1016/s0309-1740\(98\)00132-6](https://doi.org/10.1016/s0309-1740(98)00132-6). PMID: 22061861.
10. Dixit P.M., Dixit U.S. Modeling of Metal Forming and Machining Processes. -London: Springer-Verlag.- 2008.- 590p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-189-3>.
11. Zhang Y., You M., Guo Q., Li C., Zhang D., Shi D., Zhang J., Sun Z., Zhang P., Wang T., Chen Li. A review of the formability of woven fabrics for composite materials.// *Polymer composites*.-2024.- Volume45.-Iss.16.-14498-14520. <https://doi.org/10.1002/pc.28837>.
12. Rozant O., Bourban J.-A., Månson E., Drapability of dry textile fabrics for stampable thermoplastic preforms.// *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.-2000.-Vol.31.-Iss.11.- 1167-1177, [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00100-7](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00100-7).
13. Janowicz M., Galus S., Szulc K., Ciużyńska A., Nowacka M. Investigation of the Structure-Forming Potential of Protein Components in the Reformulation of the Composition of Edible Films//*Materials*.- 2024.-17.- No. 4.- 937. <https://doi.org/10.3390/ma17040937>.
14. Neamah H.A., Tandio J. Towards the development of foods 3D printer: Trends and technologies for foods printing// *Heliyon*.- 2024.-Vol.10.-Iss.13.-e33882. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33882>.
15. Li X. Multiscale computational modeling of 3D printed continuous Fiber reinforced polymer composites.//*Science Reports*.- 2025.-15.-17596. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01556-4>
16. Laleh M., Sadeghi E., Revilla R.I., Chao Q., Haghdadi N., Hughes A.E., Xu W., De Graeve I., Qian M., Gibson I., Tan M.Y. Heat treatment for metal additive manufacturing.//*Progress in Materials Science*.-2023.-Vol.133.-101051. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101051>.
17. Riabchykov M., Vilkov S., Nechipor S., Popova T. Two-dimensional studies of thermomechanical properties of textile materials for 3D formation.// *Vlakna a Textil*.- 2018.-25(2).-87-92.
18. Tsykhanovska I., Stabnikova O., Riabchykov M., Lazarijeva T., Korolyova N. Effect of Partial Replacement of Wheat Flour by Flour from Extruded Sunflower Seed Kernels on Muffins Quality Plant Foods for Human// *Nutrition*.- 2024.-79(4).-769-778.<https://doi.org/10.1007/s11130-024-01232-4>
19. Fatemi Mehrabani M., Aghaie-Khafri M., Esmaeilzadeh M. Computational Modeling of Phase Transformation in 15-5PH Stainless Steel Under Rapid Induction Heating Using FEM–JMAK Framework. In: Mirzazadeh, A., Molamohamadi, Z., Erdebilli, B., Babaee Tirkolae, E., Weber, G.W. (eds) *Science, Engineering Management and Information Technology. SEMIT 2025. Communications in Computer and Information Science*.- 2025.-vol 2651.- Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04225-5_24
20. Rubidinov Sh. G. Automation of Assembly and Installation Processes in Mechanical Engineering. // *American Journal of Engineering , Mechanics and Architecture*.- 2023.- (2993-2637).-1(10).- 141-145. <https://grnjournal.us/index.php/AJEMA/article/view/1941>

21. Yunxi Z., Wang G., Zhang D., Zhang Q. Research on Assembly Process Simulation of Construction Machinery Arm Based on Digital Twin//*Engineering Proceedings*.- 2021.-10.-No.1.-52. <https://doi.org/10.3390/ecsa-8-11331>
22. Ewnetu M., Gzate Y. Assembly operation productivity improvement for garment production industry through the integration of lean and work-study, a case study on Bahir Dar textile share company in garment, Bahir Dar, Ethiopia// *Heliyon*.-2023.- Vol.9.- Iss.7.-e17917. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17917>.
23. Teshome M.M., Meles T.Y., Yang C.-L. Productivity improvement through assembly line balancing by using simulation modeling in case of Abay garment industry Gondar//*Heliyon*.-2024.-Vol.10.-Iss.1.- e23585, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23585>.
24. Savsar M., Kamel Elsaadany A., Hassneiah R., Alajmi A. Analysis of an Assembly Line in Food Processing Industry: A Case Study.// *Journal of Management & Engineering Integration*. -2017.-Vol.10.-Iss.1.-94-105.
25. Tsykhanovska I., Tovma L., Yevlash V., Lazarieva T., Blahyi O., Alexandrov A., Riabchykov M., Svidlo K., Korolyova N., Gontar T. Development of technology of crackers wuth increased food value to improve the food supply to military servants during a special period.// *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*.-2024.- 2(11-122).- 24-37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276429>.
26. Barasa S., Etene Y. Robotics in Food Manufacturing Industry in the Industry 4.0 Era. // *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. IJCSMC.-2023.-Vol.12.-Iss.8.-72 – 77. <https://doi.org/10.47760/ijcsmc.2023.v12i08.009>.

Дата надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

С.А. Федосов^[0000-0003-3457-8911], О.В. Гуда^[0000-0002-3602-7892], Л.В. Ящинський^[0000-0003-3018-3904],
Т.А. Крадінова^[0000-0002-5611-1290], **В.М. Тимошук**

Луцький національний технічний університет

СТАТИСТИКА НОСІЇВ ЗАРЯДУ В ВИРОДЖЕНОМУ І НЕВИРОДЖЕНОМУ НАПІВПРОВІДНИКУ

Електрони в зоні провідності та дірки у валентній зоні можна розглядати як ідеальний Фермі-газ. У напівпровідниках при не дуже низьких температурах кінетична енергія електронів більша за кулонівську енергію, тому електрони можна розглядати як вільні. Для ідеального Фермі-газу ймовірність заповнення стану з енергією E при температурі T знаходиться за допомогою розподілу Фермі.

Для виродженого і невиродженого напівпровідника знайдено вирази для обчислення концентрацій носіїв заряду, електронів у зоні провідності і дірок у валентній зоні, коли відомо положення рівня Фермі. Вирази для концентрацій електронів і дірок значно спрощуються, якщо напівпровідник є невироджений.

Ключові слова: електрон, дірка, зона провідності, валентна зона, концентрація носіїв заряду, енергія Фермі.

S. Fedosov, O. Huda, L. Yashchynskyy, T. Kradinova, V. Tymoshchuk

STATISTICS OF CHARGE CARRIERS IN A DEGENERATE AND NON-DEGENERATE SEMICONDUCTOR

Electrons in the conduction band and holes in the valence band can be considered as an ideal Fermi gas. In semiconductors at not very low temperatures, the kinetic energy of electrons is greater than the Coulomb energy, so electrons can be considered as free. For an ideal Fermi gas, the probability of filling a state with energy E at temperature T is found using the Fermi distribution.

For a degenerate and non-degenerate semiconductor, expressions have been found for calculating the concentrations of charge carriers, electrons in the conduction band, and holes in the valence band, when the position of the Fermi level is known. The expressions for the concentrations of electrons and holes are greatly simplified if the semiconductor is non-degenerate.

Keywords: electron, hole, conduction band, valence band, charge carrier concentration, Fermi energy.

Постановка проблеми. Носіями заряду (струму) у напівпровіднику є електрони зони провідності та дірки валентної зони. Загалом же у напівпровіднику можуть бути домішки як донорного, і акцепторного типів. У цьому випадку при $T > 0$ К у результаті теплового збудження електрони переходитимуть у зону провідності і на акцепторні рівні.

У результаті теплових переходів (знизу вгору за енергією) утворюються носії заряду. Якби теплові переходи були єдиними, то концентрація носіїв заряду безперервно зростала з часом і була б $10^{22} \div 10^{23}$ см⁻³, проте експерименти дають менше значення. Це пов'язано з тим, що поряд з тепловим збудженням одночасно протікає зворотний процес – процес рекомбінації (переходи носіїв зверху до низу). За час $t \approx 10^{-12}$ с встановлюється динамічна рівновага між процесами. У цьому випадку кількість переходів за одиницю часу знизу вгору дорівнює кількості переходів зверху вниз.

У рівноважному стані температура кристала однакова у всіх його точках. В адіабатичному наближенні вважається, що тепловий рух кристалічної ґратки впливає на ймовірність заповнення носіями заряду станів у зонах, але не на самі стани. У напівпровідниках, як і металах, ймовірність заповнення електронном енергетичного рівня з енергією E визначається функцією розподілу Фермі-Дірака.

Задачі пов'язані із статистичними методами знаходження концентрації носіїв заряду у напівпровідниках були і залишаються актуальним [1-5] при розгляді властивостей електронної системи у виродженому і невиродженому напівпровіднику.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – розглянути методи знаходження концентрації електронів у зоні провідності, дірок у валентній зоні, знайти вирази для обчислення концентрацій електронів і дірок для виродженого і невиродженого напівпровідника за відомим положенням рівня Фермі.

Викладення основного матеріалу. Поведінка будь-якої системи, яка складається з великої кількості частинок описується статистичними законами. Для розгляду вибирають деяку підсистему, яка є частиною значно більшої системи-термостата і слабо з нею взаємодіє. Важливим поняттям статистичної фізики є функція розподілу, яка характеризує розподіл частинок по координатах і імпульсах. Оскільки кожен такий розподіл визначає стан системи, то можна сказати, що функція розподілу характеризує різні стани системи, яка складається з багатьох частинок. У випадку, якщо система складається з N частинок, то її стан повністю визначається заданням координат і імпульсів всіх частинок системи. Ймовірність даного стану системи визначається з допомогою функції

розподілу. З допомогою функції розподілу можна визначити середнє значення будь-якої фізичної величини.

При розгляді властивостей електронної системи у напівпровіднику часто доводиться визначати експериментальні величини, що залежать від кількості дозволених станів електронів, які приходяться на одиничний інтервал енергії. В інтервалі енергії dE може міститися різна кількість станів, що має бути пропорційною dE , і коефіцієнт пропорційності має залежати від величини енергії, в околі якої визначається елементарний інтервал dE . Отже, знаючи густину станів $N(E)$ можна знайти кількість електронів dn , що займають стани з енергією від E до $E + dE$:

$$dn = f_n(E) \cdot N(E) \cdot dE,$$

де $f_n(E) = \left[\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1}$ – функція розподілу Фермі або імовірність того, що стан з

енергією E зайнятий електроном; E_F або F – хімічний потенціал або енергія Фермі (рис. 1).

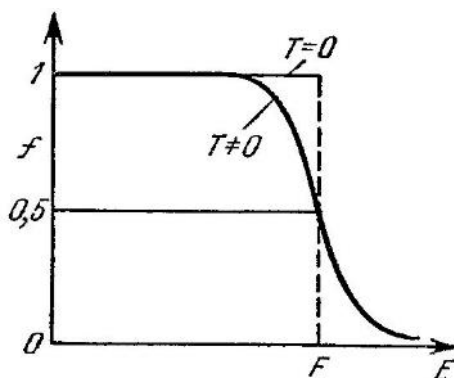


Рис. 1. Функція Фермі-Дірака

Концентрація електронів у зоні провідності обчислюється як:

$$n = \int_{E_C}^{\infty} f_n(E) \cdot N(E) \cdot dE.$$

У якості верхньої межі інтегрування необхідно взяти енергію електронів верхнього краю зони провідності. Але оскільки при $E > E_F$ функція розподілу дуже швидко спадає з ростом E , то заміна верхньої межі на ∞ практично не впливає на значення даного інтегралу. Перш ніж обчислювати концентрацію n , оговоримо деякі властивості функції розподілу (див. рис. 1).

При $T \rightarrow 0$, для значень енергії $0 \leq E < E_F$, $f \rightarrow 1$ (або для електронів, як $f_n(E) \rightarrow 1$), для $E > E_F$, $f_n(E) \rightarrow 0$. Це означає, що всі рівні з енергією $< E_F$ зайняті електронами, а при $E > E_F$ – вільні.

Для випадку $T > 0$, при $E = E_F$, $f = 1/2$. Тобто при температурі $T > 0$ рівень Фермі є рівнем, імовірність заповнення якого рівна $1/2$. Імовірність того, що даний рівень не зайнято електроном (зайнято діркою) буде рівна:

$$f_p(E) = 1 - f_n(E) = 1 - \left[\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} = \left[\exp\left(\frac{E_F - E}{kT}\right) + 1 \right]^{-1}$$

або

$$f_p(E) = \frac{1}{e^{\frac{E - E_F}{kT}} + 1}.$$

Отже, функція розподілу для дірок аналогічна функції розподілу для електронів, тільки енергія відраховується від рівня Фермі в протилежному напрямі, ніж для електронів. Напівпровідникові матеріали, в яких вільні носії заряду описуються функцією розподілу Фермі-Дірака називають виродженими.

Для електронів, енергія яких $E - E_F \gg kT$:

$$f_n(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \approx e^{\frac{E_F-E}{kT}} = C \cdot e^{\frac{-E}{kT}},$$

де $C = e^{\frac{E_F}{kT}}$, а отже співпадає з функцією розподілу Максвела-Больцмана. Якщо носії заряду в напівпровіднику підлягають розподілу Больцмана, то такі напівпровідники називають невідродженими.

Знайдемо концентрацію електронів у зоні провідності:

$$n = \int_{E_C}^{\infty} \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \frac{(2m_n)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (E - E_C)^{1/2} dE.$$

Введемо нову змінну інтегрування

$$x = \frac{E - E_C}{kT}$$

і позначення $\eta = \frac{E_F - E_C}{kT}$, причому $dx = \frac{dE}{kT}$. Тоді

$$(E - E_C)^{1/2} = (kT)^{1/2} \left(\frac{E - E_C}{kT} \right)^{1/2} = x^{1/2} (kT)^{1/2} \quad \text{і} \quad dE = d \left(\frac{E - E_C}{kT} \right) kT = kT dx,$$

а

$$e^{\frac{E-E_F}{kT}} = e^{\frac{(E-E_C)-(E_F-E_C)}{kT}} = e^{x-\eta}, \quad \text{при } E = E_C \Rightarrow x = 0.$$

Як результат перетворень, отримаємо:

$$\begin{aligned} n &= \int_0^{\infty} \frac{x^{1/2}}{e^{x-\eta} + 1} \frac{(kT)^{1/2} (2m_n)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} kT dx = \frac{(2m_n kT)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^{\infty} \frac{x^{1/2}}{e^{x-\eta} + 1} dx = \\ &= 2 \times \frac{(2\pi m_n kT)^{3/2}}{(2\pi \hbar)^3} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{x^{1/2}}{e^{x-\eta} + 1} dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_C \Phi_{1/2}(\eta), \end{aligned}$$

де $N_C = 2 \left(\frac{m_n kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$ – ефективна густина станів в зоні провідності, а $\Phi_{1/2}(\eta) = \int \frac{x^{1/2} \cdot dx}{e^{x-\eta} + 1}$ –

інтеграл Фермі порядку $1/2$. Його значення залежить від параметра η і порядку. В загальному вигляді він не виражається через елементарні функції, а його значення визначається з таблиць.

Проводячи аналогічні міркування можна знайти вираз для визначення концентрації дірок у валентній зоні. Відмінність полягає в тому, що підраховувати потрібно тільки число незайнятих станів, та інтегрування вести в межах валентної зони:

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} N_V(E) f_p(E) dE.$$

У цьому випадку:

$$p = 2 \left(\frac{m_p kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{x^{1/2} dx}{e^{x-\eta^*} + 1} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_V \Phi_{1/2}(\eta^*),$$

де $x = \frac{E_V - E}{kT}$; $\eta^* = \frac{E_V - E_F}{kT}$; $N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{(2\pi \hbar)^2} \right)^{3/2}$ – ефективна густина станів у валентній

зоні; $\Phi_{1/2}(\eta^*) = \int_0^{\infty} \frac{x^{1/2} dx}{e^{x-\eta^*} + 1}$ – інтеграл Фермі.

Вирази для концентрації електронів і дірок значно спрощуються, якщо напівпровідник невідроджений. На графіках рис. 2 зображено даний випадок, де зображено залежності від енергії: густини станів $N_C(E)$, функції Фермі $f(E)$ і $\frac{dn}{dE}(E)$, де dn – концентрація електронів з енергією

від E до $E + dE$. У даному випадку істотним є тільки «хвіст» розподілу Фермі, який апроксимується розподілом Больцмана.

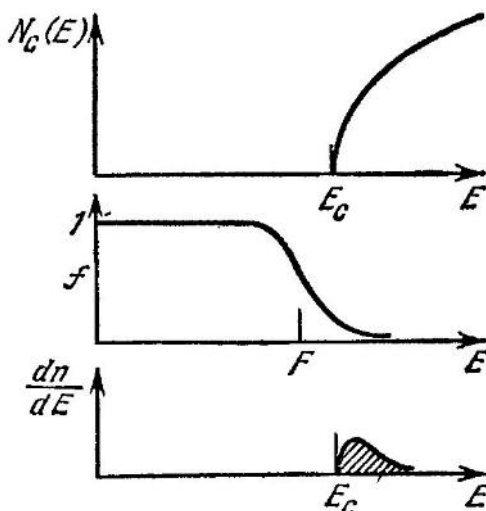


Рис. 2. Схематичний хід функцій $N_c(E)$, $f(E)$ і $\frac{dn}{dE}(E)$ для невідродженого напівпровідника n -типу

Для невідродженого напівпровідника $\eta < -1$, тоді інтеграл Фермі:

$$\Phi_{1/2}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{x^{1/2} \cdot dx}{1 + e^{x-\eta}} = e^{\eta} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\infty} e^{-x} x^{1/2} dx = e^{\eta} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot 2 \int_0^{\infty} e^{-z^2} z^2 dz = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{\eta} = e^{\eta},$$

отже

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right).$$

Аналогічно для концентрації дірок в невідродженому напівпровіднику, одержано:

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right).$$

Покладаючи, наприклад, $T = 300$ К, $m_n = m_0$, отримаємо $N_{c(v)} = 2,5 \times 10^{19}$ см⁻³.

Знайдемо добуток np :

$$np = N_c \exp\frac{E_F - E_c}{kT} N_v \exp\frac{E_v - E_F}{kT} = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2,$$

де n_i – концентрація електронів в умовах, коли $n = p$, тобто у власному напівпровіднику. Отже, добуток np не залежить від положення рівня Фермі. Дане співвідношення часто використовують для визначення ширини забороненої зони.

У випадку коли $\eta > 5$, рівень Фермі лежить в середині зони провідності (рис. 3). У цьому випадку $e^{x-\eta} \ll 1$, в якості верхньої межі інтегрування можна взяти $x_m = \frac{E_F - E_c}{kT}$, оскільки функція

Фермі дуже швидко спадає при $E > E_F$. Тоді отримаємо наступний вираз для концентрації:

$$n = N_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x_m} x^{1/2} dx = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} N_c x_m^{3/2} = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} N_c \left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right)^{3/2}.$$

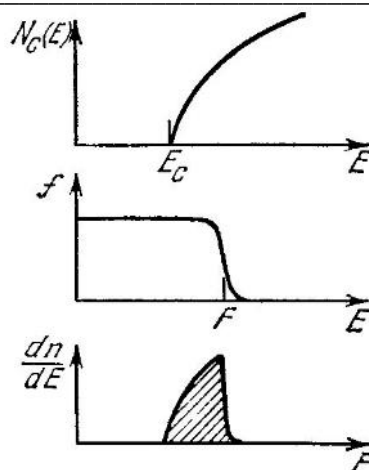


Рис. 3. Схематичний хід функцій $N_C(E)$, $f(E)$ і $\frac{dn}{dE}(E)$ для сильно виродженого напівпровідника n-типу

При температурі абсолютного нуля всі стани в зоні, енергія яких $E > E_F$ зайняті електронами, а при $E > E_F$ – вільні. Тоді хімічний потенціал $\eta = E_F - E_C$ є максимальна енергія електронів при $T = 0$ К, її ще називають енергією Фермі. В перехідній області $-1 < \eta < 5$,

$$\Phi_{1/2}(\eta) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{1}{0,25 + e^{-\eta}}, \quad \text{а} \quad n = N_C \frac{1}{0,25 + e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}}}.$$

Висновки. Знайдено вирази для обчислення концентрацій носіїв заряду, як концентрації електронів у зоні провідності, так і дірок у валентній зоні для виродженого і невиродженого напівпровідника, коли відомо положення рівня Фермі. Вирази для концентрації електронів і дірок значно спрощуються, якщо напівпровідник невироджений. Але рівень Фермі може змінювати своє положення в залежності від температури і концентрації домішок. Вводячи домішки в напівпровідник, в забороненій зоні напівпровідника утворюються дискретні рівні. Розподіл носіїв зарядів по цих рівнях регулюється зміною положення рівня Фермі.

Список використаних джерел:

1. Nenshev A. V., Gebhard E., Meerholz K., Baranovskii S. D. Computation of the spatial distribution of charge-carrier density in disordered media. *Entropy*. 2024. Vol. 26, №5. 356.
2. Tarkhanyan R. H., Niarchos D. G. Thermoelectric figure of merit in transverse magnetic field under adiabatic and isothermal conditions *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. Vol. 493. 165660.
3. Karkri A., Chetouani A., Moussaid D., Elqebbjaj S. E., Benaichi M. Investigation of tunneling effects modeling in degenerate semiconductors. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2017. Vol. 8, № 3. P. 809–815.
4. Emtsev V. V., Ambrosimov N. V., Kozlovskii V. V., Oganessian G. A. Vacancy-donor pairs and their formation in irradiated n-Si. *Semiconductors*. 2014 Vol. 48, № 11. P. 1438–1443.
5. Mohammad S. N. Boundary conditions and current-voltage relations for heavily doped p-n diodes. *Solid State Electronics*. 1987. Vol. 30, № 7. P. 713–718.

Дата надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

Б. Троць¹, Ю.В. Івановський², Л.І. Никируй³^[0000-0002-3754-0348], О.В. Замурусва²^[0000-0003-0032-0613],
С.А. Федосов¹^[0000-0003-3457-8911]

Луцький національний технічний університет¹
Волинський національний університет імені Лесі Українки²
Карпатський національний університет імені Василя Стефаника³

НАНОТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ: ПЕРЕВАГИ, ВИКЛИКИ І ПЕРСПЕКТИВИ

На основі вивчення і аналізу передових світових досліджень, які пов'язані з можливостями застосування нанотехнологій, у статті ми провели оцінку перспектив розвитку використання нанотехнологій в енергетиці. Застосування нанотехнологій відкриває нові широкі можливості для покращення ефективності, стабільності та екологічної чистоти енергетичних систем. Однак, разом з потенційними перевагами, також вносить певні виклики і ризики, пов'язані з безпекою, екологією та регулятивними аспектами.

Ключові слова: нанотехнології, енергетика, пристрій, сонячна панель, наноматеріал, наномасштабування.

B. Trots, Yu. Ivanovskiy, L. Nykyruy, O. Zamurujeva, S. Fedosov

NANOTECHNOLOGY IN ENERGY: ADVANTAGES, CHALLENGES AND PROSPECTS

Based on the study and analysis of advanced world research related to the possibilities of applying nanotechnologies, in the article we assessed the prospects for the development of the use of nanotechnologies in the energy sector. The application of nanotechnology opens up new broad opportunities for improving the efficiency, stability and environmental friendliness of energy systems. However, along with potential advantages, it also introduces certain challenges and risks related to safety, ecology and regulatory aspects.

Keywords: nanotechnology, energy, device, solar panel, nanomaterial, nanoscaling.

Постановка проблеми. Нанотехнології є однією з найбільш інноваційних галузей науки і техніки, що вивчає та застосовує матеріали та структури на рівні нанометрів. Вони відрізняються від традиційних матеріалів своїми унікальними властивостями, такими як велика площа поверхні, висока реактивність і покращені фізичні, хімічні та електронні властивості. У сфері енергетики нанотехнології мають великий потенціал для розвитку інноваційних рішень, спрямованих на вирішення важливих енергетичних викликів сучасності [1].

Одним із напрямків використання нанотехнологій в енергетиці є розробка нових типів сонячних батарей. Використання наночастинок у сонячних панелях може покращити їхню ефективність і знизити вартість виробництва, що робить сонячну енергію більш доступною та ефективною. Інший важливий аспект – це використання нанотехнологій у розробці нових матеріалів для виробництва паливних елементів. Наноматеріали можуть покращити каталітичні властивості паливних елементів, забезпечуючи більшу ефективність конвертації енергії та знижуючи витрати на їх виробництво. Крім того, нанотехнології використовуються у розробці нових систем зберігання та передачі енергії. Наприклад, наноматеріали можуть бути використані для створення нових типів батарей з великою ємністю та швидкістю заряджання, а також для розробки ефективних систем зберігання енергії, таких як нанотехнології на основі літійових акумуляторів.

У світлі зростаючого інтересу до використання альтернативних джерел енергії та розвитку сталих енергетичних систем, нанотехнології можуть стати ключовим інструментом у досягненні цих цілей. Вони відкривають нові можливості для покращення ефективності, надійності та стійкості енергетичних систем, що сприяє переходу до більш сталого та екологічно чистого енергетичного майбутнього.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню застосування, переваг, а отже і перспектив розвитку використання нанотехнологій в енергетиці опубліковано велику кількість наукових праць. Зокрема, у базі Scopus за період 1993–2026 рр., відображено майже 11 тис. наукових публікацій. Причому, суттєве зростання активності досліджень спостерігається з 2000-их років (рис. 1) і зберігається до сьогодні. Так, у [2] надано огляд та оцінку найсучасніших фотодетекторів на основі графену, інших двовимірних матеріалів і гібридних систем, заснованих на поєднанні різних двовимірних кристалів або двовимірних кристалів та інших (нано) матеріалів, такі як плазмонні наночастинок, напівпровідники, квантові точки, або їх інтеграція з (кремнієвими) хвилеводами. У статті [3] представлено детальний огляд фізичних властивостей InN і споріднених нітридних напівпровідників III групи. Описано прогрес, перспективи і проблеми в розробці нових електронних та оптоелектронних пристроїв на основі сплавів InGaN. Досягнення в характеристиках і розумінні наноструктур InN і InGaN також розглянуті в порівнянні з їх тонкоплівковими аналогами.

Активні кристалічні поверхні SnO₂ відіграють життєво важливу роль у його багатьох цікавих властивостях, включаючи сенсорні та каталітичні застосування.

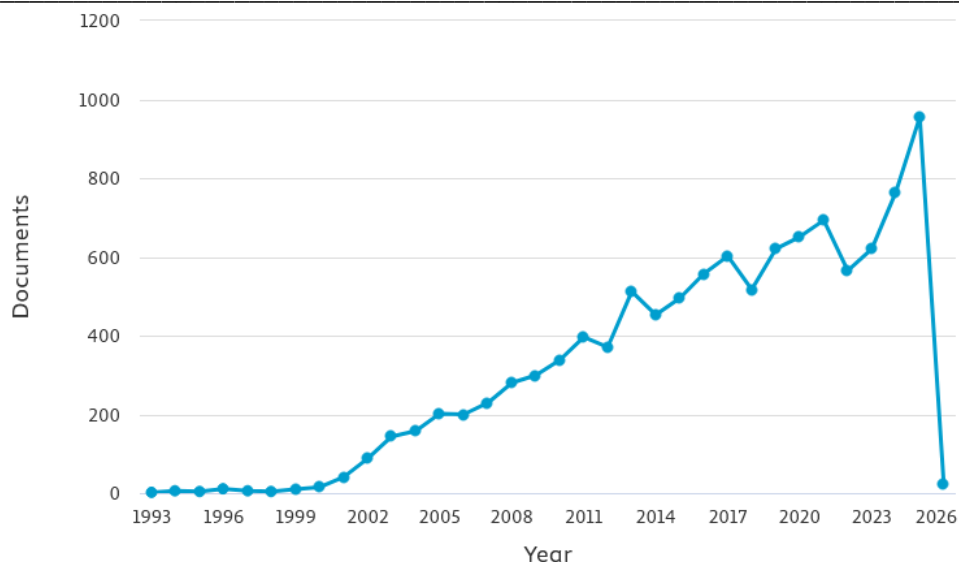


Рис. 1. Публікації за роками

Огляд [4] написано про його різні поверхні, електронну структуру та щільність станів. Обговорення важливості морфологічних варіацій властивостей SnO_2 супроводжується оглядом різних методів отримання таких структур, а також майбутній курс SnO_2 як важливого матеріалу в сучасних дослідженнях. Розвиток нанотехнологій з використанням органічних матеріалів є однією з найбільш інтелектуально та комерційно захоплюючих історій нашого часу. В огляді [5] показано, як взаємодія між синтетичною хімією та спектроскопією просунула сферу органічних наноматеріалів вперед до кінцевої мети нової технології. В огляді [6] автори зосереджуються на дослідженнях утворення нанодротяних структур шляхом високоанізотропного росту нанокристалів напівпровідникових і металооксидних матеріалів з наголосом на структурній характеристиці зародження, початкового росту, дефектів і структур розділу, а також як на теоретичному аналізі утворення нанокристалів, реакційної здатності та стабільності.

Аналіз публікацій авторитетних світових вчених у галузі наноструктур для оптоелектронних технологій пророблено у [7]. Окреслено коло провідних публікацій у науковій галузі, проаналізовано фактори впливу вчених різних країн на розвиток цієї галузі. У статті [8] представлено короткий огляд nexnano (Nexnano – це інструмент моделювання напівпровідникових нанопристроїв, розроблений для прогнозування та розуміння широкого діапазону електронних і оптичних властивостей напівпровідникових наноструктур) і надано чотири приклади, які демонструють широкий спектр можливих застосувань цього програмного забезпечення в галузі твердотільних квантових обчислень, наноелектроніки та оптоелектроніки.

У [9], на основі періодичного контакту/відокремлення між шкірою людини та мікроструктурованою полідиметилсилоксановою (PDMS) плівкою, продемонстровано прозорий гнучкий трибоелектричний наногенератор (TENG) за допомогою відносно простого, недорогого, екологічно чистого та високоефективного методу. У [10] представлено та застосовано неінвазивну оптоелектронну наноскопію для локального вимірювання оптичних та електронних властивостей графенових пристроїв. Це досягається шляхом поєднання скануючої інфрачервоної наноскопії ближнього поля з електричним зчитуванням, що дозволяє відображати інфрачервоний фотострум на масштабах довжини в десятки нанометрів. Виявлений у [11] ефект Рашби для налаштування термоелектричних характеристик може бути альтернативним методом розробки високоефективних термоелектричних матеріалів.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – на основі вивчення і аналізу передових світових досліджень, пов'язаних з можливостями застосування нанотехнологій, оцінити перспективи розвитку використання нанотехнологій в енергетиці.

Викладення основного матеріалу.

Огляд нанотехнологій. Нанотехнології є однією з найбільш активно розвиваючих галузей науки та технологій, яка ставить своїм завданням вивчення та використання матеріалів і структур на нанометровому рівні. Основні принципи нанотехнологій виникли з вивчення фізичних і хімічних властивостей матеріалів на нано-рівні. Одним з перших значущих кроків у цьому напрямку стало

винайдення мікроскопів з високою роздільною здатністю, що дозволило вченим бачити і маніпулювати з окремими атомами і молекулами.

Нанотехнології розвиваються у різних напрямках, включаючи наноматеріали, наноелектроніку, наномеханіку, нанобіологію тощо. Одним з ключових аспектів нанотехнологій є масштабування, що дозволяє створювати матеріали і пристрої з унікальними властивостями за допомогою контрольованого впливу на їхню структуру та властивості на молекулярному рівні.

Нанотехнології широко застосовуються у різних галузях науки та технології. Вони використовуються у виробництві електроніки для створення більш потужних і ефективних пристроїв, у медицині для розробки нових методів діагностики та лікування, у матеріалознавстві для створення нових матеріалів з покращеними властивостями, у космічній технології для створення легких і міцних матеріалів для космічних апаратів і багато інших сфер.

Нанотехнології мають великий потенціал для розвитку нових енергетичних технологій, таких як сонячна енергія, акумулятори високої ємності та енергоефективні матеріали. Їхній внесок у покращення енергетичних технологій є ключовим у забезпеченні сталого розвитку та зниженні викидів парникових газів.

Технології отримання наноматеріалів. Отримання наноматеріалів включає в себе різноманітні методи і процеси, що дозволяють виготовляти матеріали з нанометровими розмірами. Деякі з основних методів отримання наноматеріалів включають:

- *Механічне розчинення:* Метод використовує механічні сили для розчинення матеріалів на атомарному чи молекулярному рівні. Прикладом може бути механічне або магнітне мелювання.
- *Хімічні методи:* Включають хімічні реакції та процеси синтезу, такі як гідроліз, газофазне синтезування, золь-гель методи.
- *Відкладення з газової фази:* Методи використовують реакції в газовій фазі для відкладення атомів або молекул на поверхні матеріалів.
- *Хімічне відсадження:* Використання хімічних процесів для росту тонких плівок чи наночастинок на підкладках або субстратах.
- *Лазерне випаровування:* Процес, при якому матеріал випаровується лазером, а потім конденсується на поверхні для формування наноструктур.

Особливості наномасштабування. Наномасштабування – це процес створення та використання матеріалів, структур і пристроїв з розмірами від кількох до декількох сотень нанометрів. Основні особливості наномасштабування включають:

- *Велика площа поверхні:* Наноматеріали мають велику відносну площу поверхні в порівнянні з їхнім об'ємом, що забезпечує їм унікальні фізичні та хімічні властивості.
- *Квантові ефекти:* Наноматеріали можуть виявляти квантові ефекти, такі як квантове тунелювання та квантові точки, які впливають на їхні електронні та оптичні властивості.
- *Висока поверхнева енергія:* Наноматеріали можуть мати високу поверхневу енергію, що призводить до зміни їхньої хімічної активності та реактивності.
- *Велика структурна аномалія:* Наноматеріали можуть демонструвати структурні аномалії, такі як зміна кристалічної структури або збільшення кількості дефектів.

Наномасштабні матеріали та структури відкривають нові можливості для розвитку інноваційних матеріалів, пристроїв та систем у різних галузях технологій, включаючи енергетику, електроніку, медицину та інші.

Застосування нанотехнологій в енергетиці. Нанотехнології в енергетиці відкривають широкі можливості для покращення ефективності, стійкості та сталості енергетичних систем. Тут розглянемо три основні напрямки застосування нанотехнологій в енергетиці.

Виробництво сонячних батарей на основі наночастинок. Сонячна енергія вважається одним із найбільш перспективних джерел альтернативної енергії, але поточні сонячні батареї мають обмежену ефективність. Застосування нанотехнологій дозволяє покращити ефективність сонячних панелей шляхом використання наночастинок. Наночастинок можуть мати унікальні фізичні властивості, такі як підвищена поглинання світла та підвищена ефективність перетворення світлової енергії на електричну. Використання наночастинок дозволяє збільшити ефективність сонячних батарей та знизити витрати на виробництво.

Використання наноматеріалів у виробництві паливних елементів. Паливні елементи – це енергетичні пристрої, що використовують хімічні реакції для виробництва електричної енергії. Застосування наноматеріалів у паливних елементах може покращити їх ефективність та стійкість.

Наприклад, наноматеріали можуть використовуватися як катализатори для прискорення хімічних реакцій у паливних елементах, що дозволяє збільшити електричний вихід та знизити витрати палива.

Розвиток наноенергетичних систем для зберігання та передачі енергії. Нанотехнології також використовуються у розробці нових систем зберігання та передачі енергії. Наприклад, наноматеріали можуть використовуватися у батареях з високою ємністю та швидкістю заряджання, що дозволяє зберігати більше енергії та забезпечити швидке заряджання. Крім того, наноматеріали можуть бути використані у суперконденсаторах та інших енергоємних пристроях для забезпечення стабільного та ефективного зберігання енергії.

Загальний вплив застосування нанотехнологій в енергетиці полягає в покращенні ефективності та екологічної сталості енергетичних систем, що сприяє створенню більш сталого та ефективного енергетичного майбутнього.

Переваги використання нанотехнологій в енергетиці. *Підвищення ефективності енергетичних систем.* Нанотехнології дозволяють створювати нові матеріали з унікальними властивостями, що можуть значно покращити ефективність енергетичних систем. Наприклад, використання наночастинок у сонячних батареях може збільшити їхню поглинання світла та підвищити конверсійну ефективність, що призведе до збільшення виробленої електроенергії. Також, застосування наноматеріалів у паливних елементах може підвищити їхню ефективність та знизити витрати палива, що є важливим для розвитку енергоефективних технологій.

Зменшення втрат енергії під час транспортування та зберігання. Нанотехнології також можуть бути використані для створення нових матеріалів та систем для зберігання та транспортування енергії з меншими втратами. Наприклад, розробка наноматеріалів для виробництва батарей з високою ємністю та швидкістю заряджання може допомогти зменшити втрати енергії під час зберігання та транспортування електроенергії. Також, застосування наноматеріалів у провідниках може знизити опір та теплові втрати під час передачі електроенергії по мережі.

Створення нових можливостей для розвитку альтернативних джерел енергії. Нанотехнології відкривають нові можливості для розвитку альтернативних джерел енергії та зменшення залежності від вугільних та нафтових ресурсів. Вони можуть бути використані для покращення ефективності та стабільності сонячних, вітрових та гідроенергетичних установок, а також для розвитку нових технологій, таких як паливні елементи на основі водню. Це важливий крок у напрямку розвитку сталої та екологічно чистої енергетики.

Таким чином, використання нанотехнологій в енергетиці може призвести до значного покращення ефективності, стійкості та екологічної сталості енергетичних систем, що сприяє розвитку сталою та ефективного енергетичного майбутнього.

Виклики впровадження нанотехнологій в енергетиці. *Безпека та ризики зв'язані з використанням наноматеріалів.* Наноматеріали мають унікальні фізичні та хімічні властивості, але разом з цим існують певні ризики для здоров'я та навколишнього середовища. Наприклад, деякі наночастинок можуть бути токсичними при великих концентраціях або при потрапленні в організм людини через дихання чи шкіру. Також, існує ризик наноматеріалів розсіюватися в природному середовищі та впливати на екосистеми.

Екологічні аспекти виробництва та використання. Виробництво наноматеріалів може включати в себе використання різноманітних хімічних речовин та енергетичних ресурсів, що може мати негативний вплив на довкілля. Також, під час використання нанотехнологій у енергетиці необхідно враховувати можливість викидів наноматеріалів під час експлуатації та утилізації енергетичних систем.

Регулятивні аспекти впровадження нових технологій. Впровадження нанотехнологій в енергетиці вимагає розробки та впровадження ефективних регулятивних механізмів, які забезпечать безпеку та сталість використання цих технологій. Необхідно розробляти стандарти та нормативи для оцінки безпеки наноматеріалів, а також визначити правила виробництва, транспортування та використання наноматеріалів у енергетичних системах.

Вирішення цих викликів вимагає співпраці між науковими установами, промисловими компаніями, урядовими органами та громадськістю. Важливо забезпечити збалансований підхід до впровадження нанотехнологій в енергетику, що враховує як їхні потенціальні переваги, так і можливі ризики для здоров'я та довкілля.

Перспективи розвитку використання нанотехнологій в енергетиці. *Тенденції розвитку та інновації в галузі.* Нанотехнології постійно розвиваються, а разом з ними і їхнє застосування в енергетиці. Тенденції розвитку включають покращення ефективності сонячних батарей за рахунок

використання наночастинок, розвиток нових матеріалів для виробництва більш ефективних паливних елементів, а також створення енергетичних систем з вищою ємністю та швидкістю заряджання за рахунок використання наноматеріалів.

Прогнози щодо майбутнього використання нанотехнологій в енергетиці. Прогнозувати майбутнє використання нанотехнологій в енергетиці можна з впевненістю, оскільки ця галузь продовжуватиме розвиватися швидкими темпами. Прогнозується зростання використання наноматеріалів у виробництві сонячних батарей, паливних елементів, акумуляторів та інших енергетичних систем для підвищення ефективності та стабільності енергопостачання.

Рекомендації для подальших досліджень і впровадження нових рішень. Для подальшого успішного впровадження нанотехнологій в енергетиці важливо продовжувати дослідження у цій галузі та розробляти нові технології і матеріали. Рекомендації включають стимулювання державної підтримки для досліджень у галузі нанотехнологій, сприяння комерціалізації та впровадженню нових рішень, а також розвиток стандартів та нормативів для безпечного та ефективного використання наноматеріалів у енергетичних системах.

Нанотехнології мають великий потенціал для трансформації енергетичної індустрії та створення більш сталої, ефективної та екологічно чистої енергетики. З урахуванням правильних стратегій та інноваційних підходів, використання нанотехнологій може допомогти вирішити багато сучасних викликів у галузі енергетики.

Висновки. Застосування нанотехнологій у сфері енергетики відкриває широкі можливості для покращення ефективності, стійкості та екологічної чистоти енергетичних систем. Проте, разом з потенційними перевагами, використання нанотехнологій також вносить певні виклики та ризики, пов'язані з безпекою, екологією та регулятивними аспектами. Використання нанотехнологій має великий потенціал для трансформації енергетичної індустрії та створення більш сталої та ефективної енергетики, за умови врахування та вирішення всіх викликів та ризиків, пов'язаних з цим процесом.

Список використаних джерел:

6. Троць Б., Федосов С. А., Захарчук Д. А. Застосування нанотехнологій в енергетиці: переваги, виклики та перспективи. *Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи* : матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф., 18–19 жовт. 2024 р., м. Луцьк, Україна. Луцьк : ІВВ ЛНТУ, 2024. С. 167–168.
7. Koppens F.H.L., Mueller T., Avouris P., (...). Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems. *Nature Nanotechnology*. 2014. Vol. 9, № 10. P. 780–793.
8. Wu J. When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives. *Journal of Applied Physics*. 2009. Vol. 106, № 1. 011101.
9. Das S., Jayaraman V. SnO₂: A comprehensive review on structures and gas sensors. *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 66. P. 112–255.
10. Grimsdale A.C., Müllen K. The chemistry of organic nanomaterials. *Angewandte Chemie – International Edition*. 2005. Vol. 44, № 35. P. 5592–5629.
11. Wang N., Cai Y., Zhang R.Q. Growth of nanowires. *Materials Science and Engineering R: Reports*. 2008. Vol. 60, № 1–6. P. 1–51.
12. Скипальський М., Івановський Ю., Замуруєва О., Федосов С. Наноструктури для оптоелектронної техніки. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2022)* : VII Всеукр. наук.-практ. конф., 23–25 лист. 2022 р., м. Дніпро, Україна : тези доп. Дніпро, Дніпров. нац. ун-т ім. Олеся Гончара, Кременчук : НОВАБУК, 2022. С. 202.
13. Birner S., Zibold T., Andlauer T., (...). Nextnano: General purpose 3-D simulations. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2007. Vol. 54, № 9. P. 2137–2142.
14. Sun J.-G., Yang T.N., Kuo I.-S., (...). A leaf-molded transparent triboelectric nanogenerator for smart multifunctional applications. *Nano Energy* 2017. Vol. 32. P. 180–186.
15. Woessner A., Alonso-González P., Lundberg M.B., (...). Near-field photocurrent nanoscopy on bare and encapsulated graphene. *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. 10783.
16. Hong M., Lyv W., Li M., (...). Rashba effect maximizes thermoelectric performance of GeTe derivatives. *Joule*. 2020. Vol. 4, № 9. P. 2030–2043.

Дата надходження статті до видання: 14.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

© Б. Троць, Ю.В. Івановський, Л.І. Никируй, О.В. Замуруєва, С.А. Федосов

Ю. Л. Гунько^[0000-0002-1441-9625], Ю.В. Федорусь^[0000-0002-6700-7712], С.Є. Голячук^[0000-0002-4835-8154]

Луцький національний технічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ДОЗУВАННЯ РІДКИХ ПРОДУКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО УСТАТКУВАННЯ

У статті наведені результати досліджень процесів дозування рідких продуктів з різними реологічними властивостями за допомогою об'ємного дозатора, а також запропоновано конструкцію автоматизованого енергоощадного пристрою для подачі рідких продуктів до дозатора.

Ключові слова: дозування, продукт, в'язкість, точність, тиск, енергозбереження, автоматизація, установка.

Y. L. Hunko, Y. V. Fedorus, S. Ye. Holiachuk

DETERMINATION OF THE ACCURACY OF LIQUID PRODUCTS DOSING USING ENERGY-SAVING AUTOMATED EQUIPMENT

The article presents the results of research into the processes of dosing liquid products with different rheological properties using a volumetric dispenser, and also proposes the design of an automated energy-saving device for feeding liquid products to the dispenser.

Keywords: dosing, product, viscosity, accuracy, pressure, energy saving, automation, installation.

Постановка проблеми. Дозатори є важливими пристроями фасувальних машин. Дозуючі пристрої поділяються на об'ємні та вагові дозатори. На фасувальних машинах для дозування рідких матеріалів переважно встановлюють об'ємні дозатори. Такі пристрої мають високу надійність та швидкість роботи.

У харчовому виробництві дозуються рідкі продукти з різними властивостями. Водночас, для самих рідких продуктів властивості можуть бути різними залежно від стану та умов взаємодії із середовищем.

Оскільки для дозуючих пристроїв визначальними показниками є показники якості процесу дозування, то важливо дослідити процеси взаємодії рідких продуктів із робочими органами дозаторів, щоб визначити необхідні режими роботи обладнання.

Для в'язких рідких продуктів, зокрема, важливою характеристикою є показник опору течії, що за своєю суттю є їх в'язкістю. В'язкість для рідких речовин є основним показником після перевищення межі плинності.

Метод об'ємного дозування рідких продуктів з певним спрощенням можна розглядати як відмірювання заданого об'єму продукту та заповнення цим продуктом тари. Оскільки значна частина рідких харчових продуктів є важкоплинними, то відповідно їх подачу до робочих органів фасувальних машин слід виконувати примусово.

Чим вищим є показник в'язкості для рідкого продукту, тим більш доцільним є використання примусової подачі продукту по трубопроводах та у дозаторах.

На даний час у конструкціях дозуючих пристроїв закладені такі принципи роботи, які базуються на кінематиці живильних пристроїв, але при цьому не враховується динаміка руху рідкого продукту. Динаміка руху рідких продуктів, у свою чергу, визначається реологічними властивостями матеріалів.

Процес заповнення деякого об'єму в'язким продуктом є нестационарним [3]. Рідкий продукт, підходячи у дозаторі до насадки, піддається у ній деформації.

Одним із важливих показників якості роботи дозуючих пристроїв є точність дозування рідкого продукту. Точність дозування показує міру відхилень фактичних значень доз рідкого продукту від заданих значень. Відхилення, які можуть спостерігатись, характеризуються переважальною систематичною або випадковою складовими. Перші з них можуть спричинятись через неправильне налаштування дозуючого пристрою на необхідний показник дози продукту, а також через непередбачуваний вплив на процес дозування таких чинників як температурні, динамічні або ж деякі інші.

Слід враховувати, що за великих значень швидкості течії рідкого матеріалу структура його може повністю руйнуватись, рідина при цьому характеризується найменшою (ньютонівською) в'язкістю. А за малих швидкостей течії рідкого матеріалу структура його руйнується та повністю відновлюється (рідина характеризується найбільшою в'язкістю). За умови подальшого збільшення швидкості течії руйнування структури рідкого матеріалу починає переважати над відновленням, а в'язкість значною мірою зменшується.

Як зазначалось вище, процеси дозування рідких продуктів є складними (обумовлено можливою зміною реологічних характеристик рідин), тому для об'єктивного оцінювання тих чи інших явищ, що можуть супроводжувати ці процеси, доцільно проводити експериментальні дослідження, результати яких дозволять визначити необхідні режими роботи дозуючих пристроїв фасувальних машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рідкі харчові продукти, які дозуються, переважно характеризуються хорошою плинністю і тому їх властивості, як правило, не надто ускладнюють процеси дозування через налипання частинок матеріалу на поверхні стінок конструкцій. Але, за умови зростання в'язкості рідкого харчового продукту негативні явища налипання можуть проявлятися більш виразно [4].

Різноманітність харчових рідких продуктів, що характеризуються певними хімічними та фізико-механічними характеристиками, видів їх упаковки, умов та строків їх зберігання, обумовлює потребу у використанні фасувально-дозуючого обладнання різного призначення.

У роботі Волинця Н. С. та Федорова С. Ф. [2] наведені результати дослідження роботи автомата для фасування рідких продуктів. Було встановлено, що факторами, які найбільш суттєво впливають на характер процесу дозування рідкого продукту (сметани) є наступні: молекулярна в'язкість, діаметр насадки і тиск стисненого повітря, потрібний для переміщення поршня. Внесення змін до конструкції дозувального пристрою (заміна клапана) поліпшує процес дозування. Реалізація даної пропозиції потребує відносно незначних матеріальних затрат.

Питанню визначення реології та реологічної морфології у незмішуваних двофазних полімерних модельних сумішах приділено увагу у роботі Т. Jansseune, J. Mewis, P. Moldenaers [7]. Було проведено аналіз Маффеттона-Мінале, що дозволив отримати опис форми еліпсоїдних крапель у незмішуваних двофазних полімерних модельних сумішах під час потоку.

Дослідженнями [3] було встановлено для поршневого дозатора залежність швидкості дозування рідких продуктів від в'язкості та тиску стисненого повітря.

Дослідження конструкцій дозуючих пристроїв, що застосовуються у процесах фасування рідких в'язких продуктів в тару [1-3], показало, що для дозування таких матеріалів переважно застосовуються дозатори, що працюють за об'ємним принципом.

Дозуючі пристрої, що працюють за об'ємним принципом, хоча й характеризуються дещо нижчою точністю дозування вагові дозатори, але мають перевагу за швидкістю дозування матеріалів.

На даний час у харчовому виробництві найбільш широке застосування отримали шнекові, плунжерні і поршневі дозатори [2].

У роботі ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л., БІЛЕЦЬКОГО Е. В., ТОЛЧИНСЬКОГО Ю. А. [2] наведені результати вивчення проблеми математичного моделювання квазів'язкого потоку рідини у щілинних каналах шнекових пристроїв. В результаті моделювання було отримано рівняння, що дозволяють моделювати течії в'язкопластичних рідин.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету - дослідити характер зміни точності дозування рідких в'язких продуктів за допомогою автоматичного енергозберігаючого обладнання за умов зміни факторів впливу на процес дозування.

Викладення основного матеріалу. Для дослідження роботи дозатора було розроблено експериментальну установку (рис. 1).

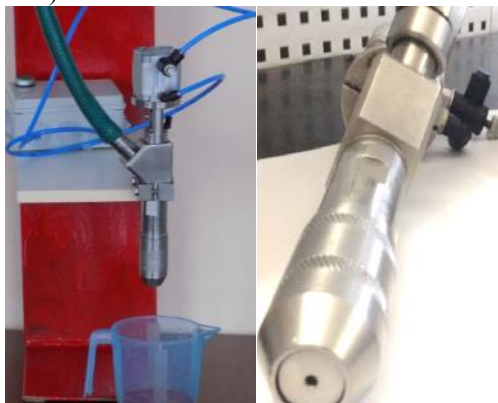


Рис. 1. Експериментальна дослідна установка дозатора рідких матеріалів

В'язкість рідкого продукту визначалась з використанням віскозиметра ВПЖ-2, тиск стисненого повітря встановлювався з використанням манометра.

За допомогою дозатора виконувалось дозування таких матеріалів як томатний сік, кетчуп, майонез (кожен з цих матеріалів характеризується показником молекулярної в'язкості).

Привод форсунки - пневматичний. Закриття виходу форсунки досягається за рахунок переміщення центрального штока, що приводиться у рух за допомогою пневматичного циліндра. Шток з'єднаний з носиком форсунки.

Характер витікання рідкого в'язкого продукту з насадки та формування розподілу швидкості руху продукту залежать від параметрів насадки (рис. 2).

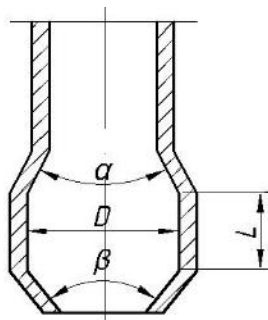


Рис. 2. Параметри насадки досліджуваного дозатора

Ці параметри наступні:

- відношення довжини отвору насадки до її діаметра L/D ;
- кута входу до насадки α ,
- кута виходу з насадки β ,
- форма і матеріал насадки.

Значення кутів входу в отвір насадки та виходу з отвору насадки можуть змінюватися у межах від 0° до 180° .

У насадці струмінь рідкого продукту насамперед стискається, а потім розширюється, дотикаючись до внутрішніх стінок насадки та виходить повним перерізом.

Рух рідкого продукту у циліндричній насадці обмежується певним значенням мінімального тиску у стиснутому перерізі. Показник цього тиску залежить від тиску, що забезпечується пневматичним циліндром. Тому, відповідно має бути певна межа для тиску, що створюється пневматичним циліндром. За вищого значення від цієї межі якість роботи насадок може погіршуватись.

Були проведені експериментальні дослідження роботи дозатора для встановлення значення тиску стисненого повітря, за якого може спостерігатись погіршення його роботи, що виражається у зниженні показника точності дозування. Дослідження проводились для трьох різних видів рідких продуктів. На рис. 3 наведені результати досліджень.

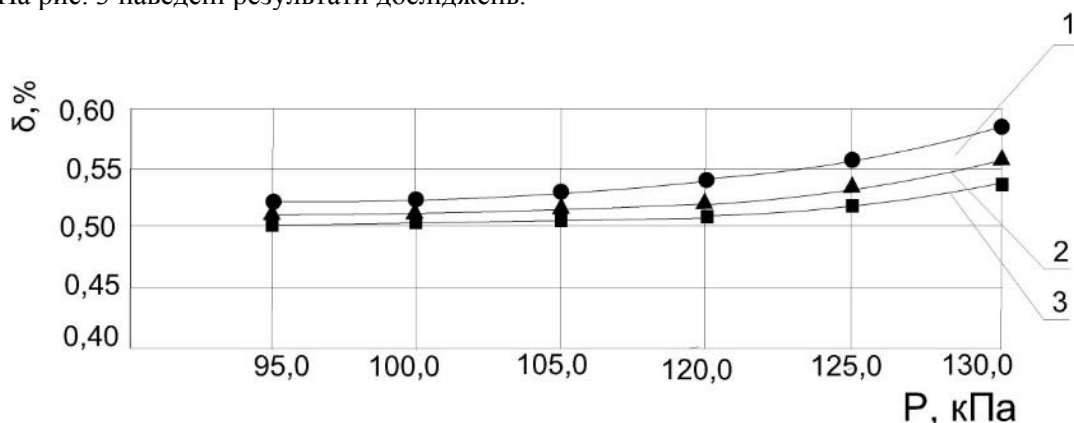


Рис. 3. Залежності для визначення точності дозування: 1 - для майонезу; 2 - для кетчупу; 3 - для томатного соку.

Результати досліджень показали, що при досягненні показника тиску стисненого повітря 120 кПа і вище погрішність дозування зростає і стає вищою за 0,55 %, що можна пояснити утворенням вакууму у стисненому перерізі дозуючої насадки. Проте, такі похибки дозування ще відносяться до допустимих.

Для того, щоб забезпечити ефективне дозування рідких продуктів у якості автоматизованої ємкості, з якої продукт може подаватись до дозуючого пристрою пропонується використовувати наступну конструкцію (рис. 3).

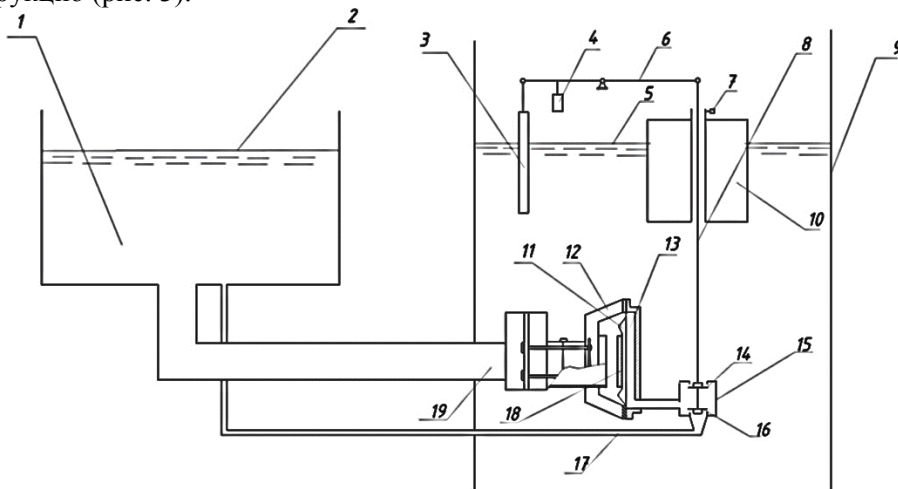


Рис. 4. Автоматизована ємкість для подачі рідких продуктів: 1 - ємкість постійного рівня; 2 - рівень продукту; 3 - трубка; 4 - калібрована вага; 5 - верхній рівень продукту; 6 - коромисло; 7 - гвинт; 8 - шток; 9 - ємкість; 10 - поплавков; 11 - мембрана; 12 - ребра; 13 - робоча камера; 14, 16 - клапани; 15 - клапанна коробка; 17 - імпульсна трубка; 18 - диск; 19 - трубопровід.

Корпус робочої камери через ребра жорсткості з'єднаний з трубопроводом, з'єднує ємкість 1 та ємкість 9. Клапанна коробка 15 з'єднана з ємкістю 9 отвором, а з ємкістю 1 - трубкою. Отвори і трубка перекриваються відповідно клапанами 14 та 16, що встановлені на штоку 8.

На штоку також знаходиться поплавковий чутливий елемент. Він виконаний у вигляді порожнинного циліндра. Його положення регулюється за допомогою гвинта 7.

Шток пристрою зв'язаний шарнірно з одним плечем коромисла 6, а інше його плече зв'язане із зануреною у рідкий продукт вертикальною герметичною трубкою 3. Площа січення цієї вертикальної трубки за зовнішнім діаметром рівна добутку загальної площі поперечних січень порожнинного циліндра та штока і відношенню довжин плеч коромисла. На одному з плечей коромисла встановлена калібрована вага 4. Положення каліброваної ваги визначає установку необхідного рівня рідкого продукту.

Певній порції рідких продуктів відповідає рівень 2. По мірі опорожнення мірної ємкості тиск на клапан 16 знижується, шток 8 опускається та відкривається отвір, який з'єднує ємкість 9 з робочою камерою 13, зростає сила гідростатичного тиску на мембрану, що вигинається і рідкий продукт по трубопроводу надходить у ємкість 1. При досягненні рівня рідкого продукту у мірній ємкості необхідного значення тиск на клапан 16 забезпечує підняття штоку із розміщеними на ньому клапанами та перекривання отвору, що з'єднує сполучає ємкість 9 із робочою камерою 13.

Висновок. Результати проведених досліджень показали, що характер процесу дозування рідких в'язких продуктів залежить від реологічних властивостей продуктів та особливостей конструкції насадки. Також, було встановлено, що при тиску стисненого повітря понад 120 кПа спостерігається погіршення точності дозування через виникнення вакууму у просторі насадки дозатора.

Було запропоновано конструкцію автоматизованого енергозберігаючого пристрою - ємкості для подачі рідкого продукту, яка має гідравлічний привод виконавчих робочих органів.

Список використаних джерел

1. Білецький Е. В. Визначення гідравлічних втрат при течії в'язкої рідини / Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Вісник Львівського інституту економіки і туризму. – Львів : ЛІЕТ, 2011. – №6. – С. 143 – 148. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2014_2_12

2. Волинець Н. С. Дослідження процесу дозування в'язких молочних продуктів з метою вдосконалення конструкції фасувального автомату М-2 / Н. С. Волинець, С. Ф. Федоров // Ukrainian food journal. - 2012. - № 3. - С. 54 – 58. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/21354>

3. Гунько Ю.Л. Дослідження роботи дозатора рідких продуктів / Ю.Л. Гунько, С.Є. Голячук, Ю.В. Федорусь // Наукові нотатки. – 2022. – Випуск 74.– С.152 – 155. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2022.74.25>

4. Гуць В. С. Метод аналізу реологічних моделей в'язко-пружно-пластичних матеріалів у пакувальних процесах / В. С. Гуць, О. А. Коваль // Упаковка. – 2013. – №4. – С. 46 – 49. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urakovka_2013_4_15

5. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л. Л. Деякі аспекти повздовжньо-поперечної течії стисненої рідини, що залежить від швидкості зрушення і тиску вздовж щілинного каналу (Частина 2) / Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – К. : НУХТ, 2012. – № 46. – С. 25 – 31.

6. Dudarev, I., Holiachuk, S., Hunko, Y., Panasyuk, S. (2021) Modeling of the mixing process in the gravitational mixer using the theory of Markov chains. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_12

7. Jansseune T. Rheology and rheological morphology determination in immiscible two-phase polymer model blends / T. Jansseune, J. Mewis, P. Moldenaers [et. al.] // J. Non-Newton. Fluid Mech. – 2000. – P. 153 – 165. [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(00\)00109-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(00)00109-9)

Дата надходження статті до видання: 27.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

Д.Е. Селезньов^[0000-0002-7729-9851], Е.Л. Селезньов^[0000-0001-6470-0661], С.Ю. Грицюк**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ВАЛА КРИВОШИПА
RV РЕДУКТОРА***Луцький національний технічний університет*

В роботі проведено дослідження статичного напруження стану валу кривошипу та розмір граничного значення напруження плинності, що необхідно для вдосконалення конструкції та матеріалу валу кривошипу.

Ключові слова: вал кривошипа, статичне напруження, RV-редуктор, напружений стан, границя плинності матеріалу, максимальне напруження, результати моделювання.

D.E. Seleznov, E.L. Seleznov, S.Y. Hrytsiuk**RESULTS OF RESEARCH ON THE STRESS STATE OF THE CRANKSHAFT OF THE
RV GEARBOX**

The paper presents research on the static stress state of a crankshaft and the limit value of yield stress, which is necessary for improving the design and material of a crankshaft.

Keywords: crankshaft, static stress, RV-reducer, stress state, yield strength of material, maximum stress, simulation results.

Introduction. The design of the RV reducer includes a whole process from determining geometric parameters, design to developing technological tolerances for dimensions. Due to the interaction of both stages of the gear speed switching mechanism, when choosing their geometric parameters, it is necessary to take into account the mutual limitation between them, and the impact on the transmission characteristics of the reducer and the accuracy of processing and manufacturing of the reducer. However, the RV reducer contains many key parts and assemblies whose design affects the characteristics of the reducer. The RV reducer has a two-stage transmission: the first stage is a conventional spur gear 2K-H, the second stage is a cycloidal KHV. The crankshaft is a key part, as it connects the two stages, and also supports and transmits motion to the two cycloidal wheels. Since a key connection is used between the crank shaft and the planetary wheel, the force perceived by the planetary wheel is transmitted to the crank shaft. All this requires targeted research to develop parameters and design the RV reducer. To ensure the accuracy of the calculation, the work uses the equivalent mode analysis method simultaneously with a simplified analysis of the perceived effort.

During continuous testing of the RV gearbox under a given load, the crankshaft experienced varying degrees of fracture. Therefore, in order to analyze the stress state of the crankshaft under a given load, and to provide a theoretical basis for improving the design of the structure and material of the crankshaft, the static stress state of the crankshaft and the size of the yield stress limit value were first analyzed. Through theoretical calculation and finite element analysis of ANSYS, the stress state of each section of the crankshaft, the bending stress limits and deformation were separately calculated, so that the analysis result was close to the actual state of the object.

Research methods. Finite Element Analysis (FEA) is based on the modeling of physical objects using mathematical algorithms [1, 2]. In this work, the modeling and analysis are performed using ANSYS software [3].

ANSYS has three main modules: 1 - Preprocessing module: Creates a mock-up model and performs finite element decomposition; 2 - Computational module: Analyzes structures, fields (fluid, magnetic) and performs coupled analysis between different physical fields (e.g. thermal coupling); 3 - Final processing module: Processes the results, including displaying cloud maps of stresses, displacements, and plotting diagrams.

Static analysis typically does not consider the effects of inertia and damping in finite element models. ANSYS is capable of performing linear analysis as well as complex nonlinear analysis, including thermal expansion, plastic deformation, and creep deformation of parts. These capabilities make ANSYS a leader in finite element analysis [3].

When creating finite elements [4], the main parameters for structural analysis are external force, stress, deformation and displacement. For this, a geometric formula is created and conditions for the associated contour are determined. The main equations and physical quantities of elastic mechanics are expressed in the corresponding formulas.

Presentation of the main material. Using ANSYS Workbench's proprietary CAD connectivity interface, a three-dimensional model created in SolidWorks was loaded into Workbench.

The specific input process is as follows:

Launch the ANSYS Workbench software, open the "Toolbox" in AWB, find the "Analysis Systems" taskbar, right-click "Static Structural", and you can create a list of static structural analysis items on the software interface.

Double-click "Geometry" in the list of items to enter the ANSYS Workbench software, where you will find the "Design Modeler" - a geometric modeling module. Click the computer file on the menu bar, and then click "Import Geometry" in the open drop-down menu. After entering the external model, a file selection dialog box will appear, where you can select the object model created in SolidWorks and confirm it, thus completing the file selection. Clicking "Generate" will allow you to enter the model into ANSYS Workbench. Fig. 1a shows the geometric model created in Workbench after the specific input.

Setting material properties. First, set the material definitions of various elements. The AWB module has its own material database, which allows the user to directly call up material data and improves work efficiency. If necessary, the user can manually add data to the material database to enrich and expand it.

ANSYS Workbench contains one of the largest databases of materials and includes parameters such as material density, elastic modulus, Poisson's ratio, etc. By clicking on the name of the parameter, a window will appear for editing the material properties, then you need to enter specific values in the corresponding physical property field, and finally click the "Return to Project" button to return to the main page of ANSYS Workbench, at which point the installation of material properties will be completed.

The quality of cell division is important in the analysis process and decides the accuracy of the final analysis results. Usually, cell division is performed in an adaptive automatic way. It is divided into three classes: coarse, medium and fine. The size of the cells is also one of the conditions that determines the accuracy of the analysis results.

The smaller the cells, the more they are, the better the accuracy, but the amount of calculation also increases. However, the results of the model analysis will be closer to the actual state, or vice versa.

Determine the cell type. Open the static structure list on the main interface of ANSYS Workbench - find and double-click "Model", enter "Mechanical", that is, the window for cellular decomposition and analysis of the structure, then find "Outline", expand the tree menu of the model "Model" under Project, and find the item " Mesh". Set the cell size of the tetrahedral object (Element size) to 5 mm, leave the other items by default. Right-click "Mesh", in the menu, then click the Generate mesh command. At this time, Workbench begins to develop a mesh for the geometric object. The geometric model after cellular decomposition is shown in Fig. 1 b. The total number of cells is 67,353, the total number of nodes is 32,136.

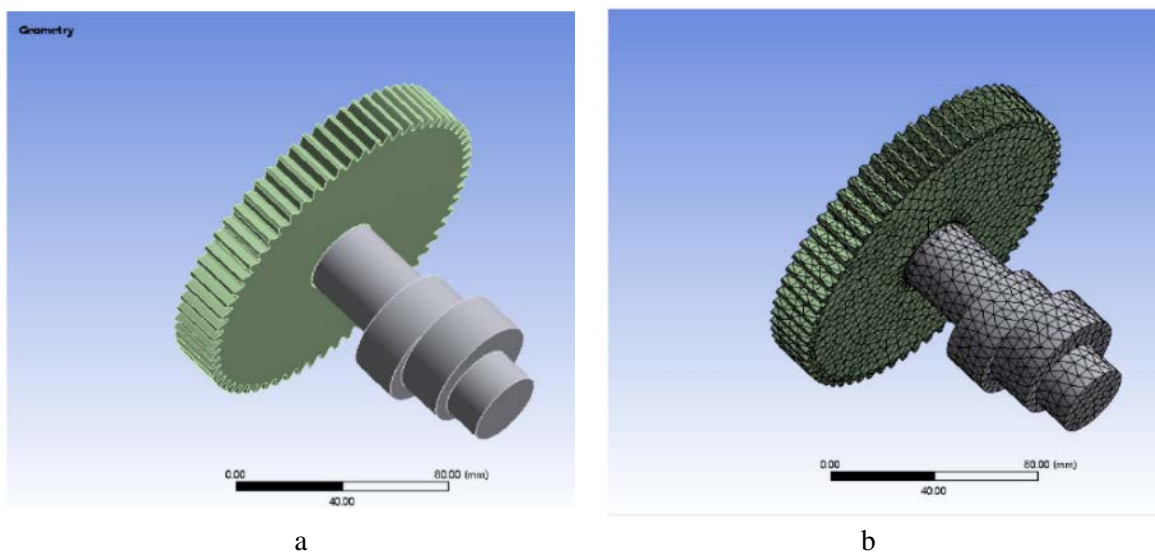


Fig 1. Crankshaft model: a) simplified model, b) model obtained after cellular decomposition

Next, we conduct a stress state study. In order to better reflect the stress state of the crankshaft, it is necessary to securely fix both ends of the crankshaft to ensure the convergence of the simulation results, otherwise it is impossible to obtain the calculation results. Therefore, the stress or deformation response at both ends of the crankshaft should be ignored in the simulation results (Fig 2).

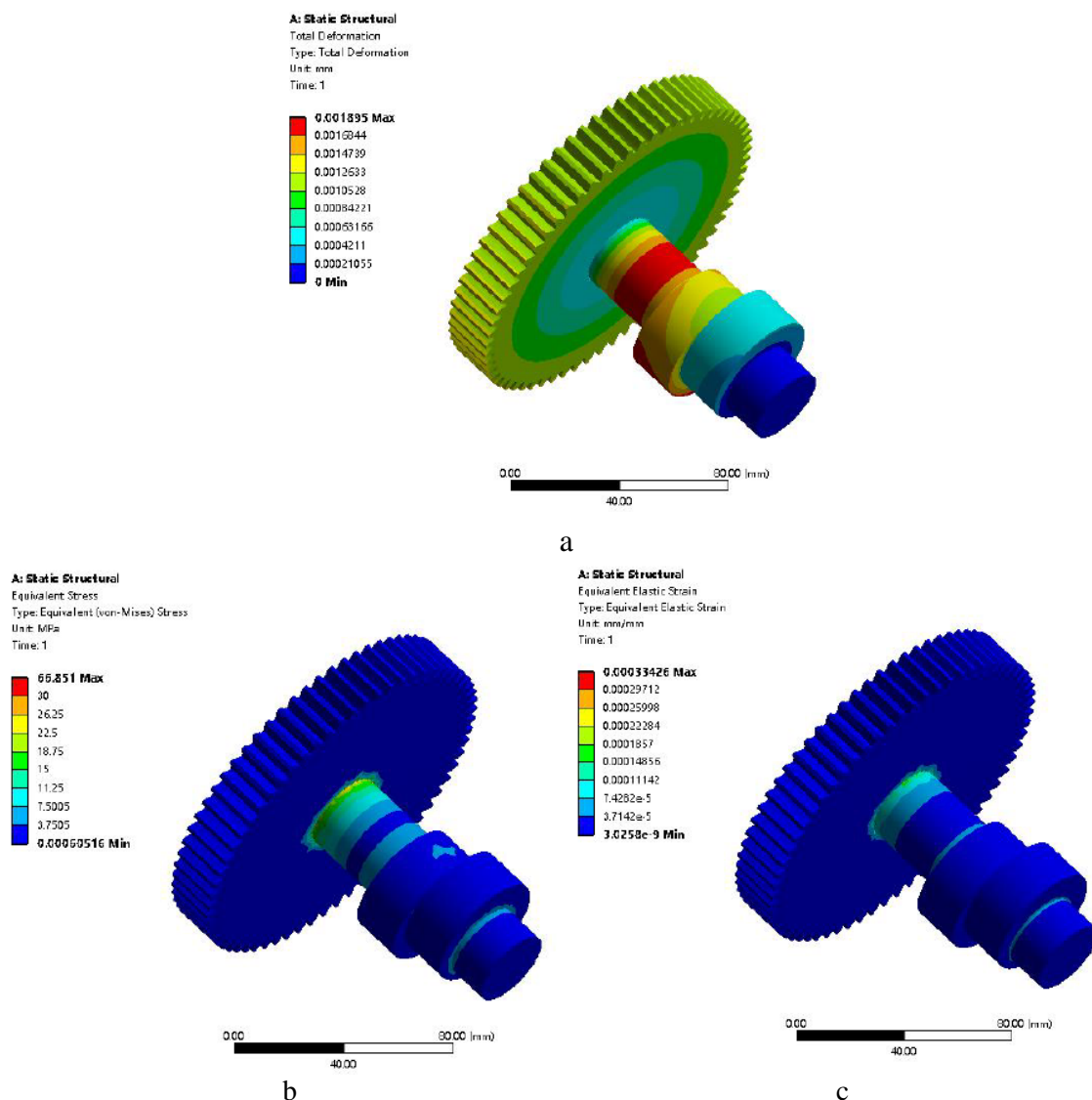


Fig. 2. Simulation results: a) displacement diagram (w), b), c) cloud stress diagram

Results. When the rotation angle (RV) of the crankshaft is equal $\theta = 15^\circ$ to the nominal torque, the stress and strain values on it are as follows. According to the simulation results, it is established that the maximum load value is concentrated in the crank (corresponding to the area shown in Fig. 4-5). The maximum stress is 66 MPa. The crankshaft is made of GCr15 bearing steel, which after heat treatment (quenching and tempering) acquires high and uniform hardness, good wear resistance and high resistance to contact fatigue. The yield strength of this material is 608 MPa. Since the calculated maximum stress (66 MPa) is much lower than the yield strength (608 MPa), the material fully meets the operating requirements. According to the stress diagram, the maximum strain is $1,8 \times 10^{-3}$ mm. This maximum strain is localized in the same zone of maximum stress - in the middle of the crankshaft.

References

1. Reddy J. N. An Introduction to the Finite Element Method. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019. 768 p.
2. Bathe K. J. Finite element procedures. 2nd ed. Watertown, MA: Klaus-Jürgen Bathe, 2014. 1066 p.
3. Moaveni S. Finite element analysis: Theory and application with ANSYS. 5th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2021. 704 p.
4. Logan D. L. A first course in the finite element method. 6th ed. Boston: Cengage Learning, 2016. 992 p.

Дата надходження статті до видання: 25.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення: 14.04.2026

З.С. Сірко¹[0000-0001-5197-9237], В.В. Ващенко¹[0000-0002-9843-8507], М.М. Толстушко²[0000-0001-9230-3831],
О.І. Єременко³[0000-0002-3377-0015], Н.О. Толстушко²[0000-0001-8811-7868]

Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"¹
Луцький національний технічний університет²
Національний університет біоресурсів і природокористування України³

ГАЗОГЕНЕРАТОР НА ВУГЛЕВМІСНИХ КОМПОНЕНТАХ ПРОМІСЛОВИХ ВІДХОДІВ

У статті висвітлені питання, пов'язані зі створенням газогенератора, його конструкцією, технічними даними, технічною та технологічною умовами експлуатації. Зазначено, що конструкція газогенератора відрізняється від аналогів тим, що вона має дві камери горіння, в одній із яких проходить первинне спалювання палива з елементами гідролізу та в іншій остаточне спалювання, де згорають паливні гази (CO, CH₄, C₂H₆, H та ін.) і екологічно чисті паливні гази подаються до теплоспоживача. Для забезпечення ефективного горіння палива та паливних газів у конструкції газогенератора передбачено два дозатора – подачі первинного та вторинного повітря. Для ефективної роботи газогенератор комплектують додатковим обладнанням: шнеком подачі палива, вентиляторами наддуву повітря та відведення димових газів, контрольно-вимірвальними приладами та системою автоматизації. Наведені основні параметри газогенератора, його технологічні показники, умови експлуатації.

Ключові слова: газогенератор, конструкція, паливо, технічні та технологічні умови експлуатації, ефективність.

Z. Sirko, V. Vashchenko, M. Tolstushko, O. Yeremenko N. Tolstushko

GAS GENERATOR BASED ON CARBON COMPONENTS OF INDUSTRIAL WASTE

The article highlights issues related to the creation of a gas generator, its design, technical data, technical and technological operating conditions. It is noted that the design of the gas generator differs from analogues in that it has two combustion chambers, in one of which the primary combustion of fuel with hydrolysis elements takes place and in the other the final combustion, where fuel gases (CO, CH₄, C₂H₆, H, etc.) burn and environmentally friendly fuel gases are supplied to the heat consumer. To ensure efficient combustion of fuel and fuel gases, the design of the gas generator provides two dispensers - primary and secondary air supply. For effective operation, the gas generator is equipped with additional equipment: a fuel supply screw, air pressure fans and flue gas removal, control and measuring instruments and an automation system. The main parameters of the gas generator, its technological indicators, operating conditions are given.

Keywords: gas generator, design, fuel, technical and technological operating conditions, efficiency.

Постановка проблеми. Устаткування більшості котелень, що в даний час експлуатуються, не відповідає вимогам екології, енергозбереження, автоматизації, безпеки та надійності. Значне моральне та фізичне зношення цього устаткування досягає близько 50%. Реальний коефіцієнт корисної дії теплогенеруючих установок становить біля 70%, що на 20-25% нижче від проектних показників. Витрата палива з метою отримання 1 Гкал теплоти значно більша, ніж у розвинених країнах.

Наведені обставини зумовлюють доцільність відмови від традиційних великих централізованих систем генерації тепла та переходу до створення нових локальних систем невеликої одиничної потужності.

Під час створення зазначеного нового устаткування важливо, щоб ефективно використовувалося органічне паливо та спостерігалось значне зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Теплообмінні процеси у топкових камерах малого об'єму повинні підвищити ефективність спалювання паливної сировини переважно рослинного походження, значно знизити забруднення атмосферного повітря навколишнього середовища викидами шкідливих речовин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток енергетики в Україні повинен мати вирішальний вплив на стан економіки в цілому, що забезпечить належний рівень життя населення країни. Запорукою цього повинно стати економічно обґрунтоване та екологічно безпечне забезпечення країни та населення енергетичними ресурсами [1].

Енергетика сьогодення повинна перейти на ефективне забезпечення сталого розвитку економіки та соціальної сфери країни основними видами енергоносіїв (електричної та теплової енергії, різними видами палива, природного газу).

Енергетична стратегія країни повинна бути спрямована на досягнення національної безпеки, незалежності та задоволення енергетичних потреб суспільства [1].

Для спалювання в енергетичних установках використовують біопаливо, що уявляє собою відходи аграрних, переробних, лісозаготівельних, деревообробних та інших виробництв, а також з

біомаси енергетичних насаджень [2]. Зазначено, що розвинуті країни світу на сучасному етапі поновлюють свої паливно-енергетичні ресурси твердими видами біопалива як на економічно вигідний та екологічний вид відновлювальної енергетики.

В роботі [3] зазначено, що спалювання викопного палива для отримання енергії завдає значної шкоди навколишньому середовищу.

Альтернативою цього виду палива може бути біопаливо. Воно виготовляється із рослинної сировини і є відновлюваним. Згідно з різними дослідженнями [4-7] біопаливо може скоротити викиди парникових газів більш ніж на 60%. Біопаливо на відміну від викопного палива містить менші концентрації хімічних речовин. Біопаливо можна виробляти локально, там де його будуть спалювати і, таким чином, зменшити транспортні витрати.

Аналіз досліджень показав, що для спалювання, у тому числі в енергетичних установках, вигідно застосовувати біопаливо із рослинної сировини, яке є відновлюваним, перспективним, екологічно безпечним.

Постановка завдань. Мета дослідження – розробити конструкцію газогенератора з можливістю отримання висококалорійного та екологічно безпечного генераторного газу.

Викладення основного матеріалу. Під час виконання роботи були застосовані наступні методи – аналітичний, стандартний метод оцінки якості виконання технологічного процесу та встановлення його відповідності українським стандартам з безпеки та ергономічності.

Умови випробувань генератора: температура повітря 17,4°C, вологість – 34,4%. Використовували три зразки палива: зразок 1 – волога біомаса; зразок 2 – деревинна тріска та тирса; зразок 3 – пелети із лущиння соняшника.

На основі попередніх досліджень газогенераторних установок та за результатами патентного пошуку була розроблена конструкція газогенератора [8], схема якого наведена на рис. 1.

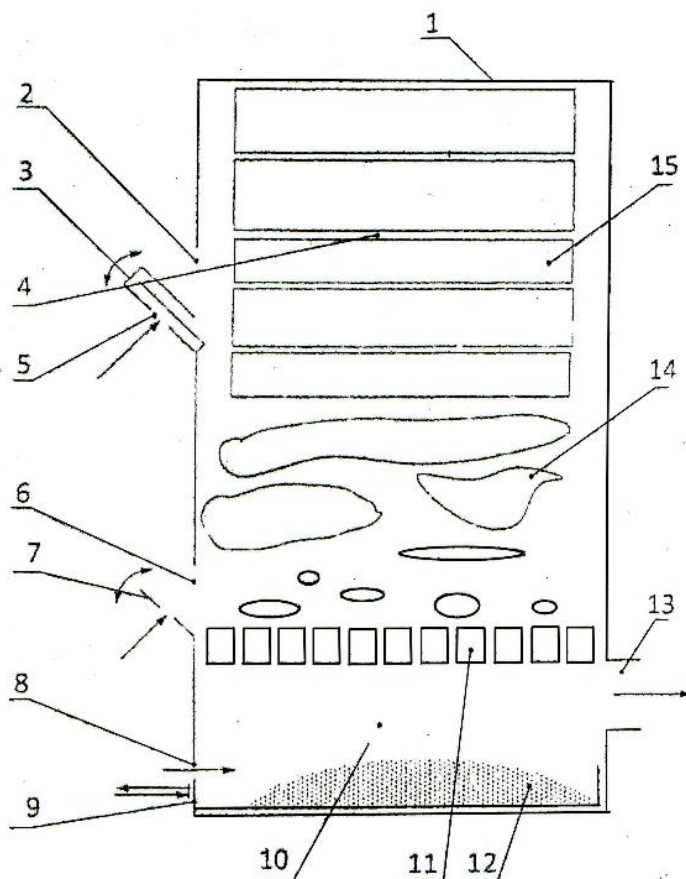


Рис.1. Газогенератор: 1 – корпус; 2 – завантажувальний отвір для палива; 3 – дверцята; 4 – камера горіння; 5 – дозатор подачі первинного повітря; 6 – шуровочне віконце; 7 – дверцята шуровочного віконця з дозатором подачі повітря; 8 – дозатор подачі вторинного повітря; 9 – дверцята зольника; 10 – зона остаточного спалювання; 11 – колосникова решітка; 12 – зольний залишок; 13 – отвір для відводу паливного газу до теплоспоживача; 14 – паливо, що частково згоріло та обвуглилося; 15 – паливо

Газогенераторна установка виготовлена для помірного кліматичного району, до якого належить Україна та зберігає свої технічні показники під час експлуатації за таких кліматичних умов: температура навколишнього повітря – 40 – 45°C; відносна вологість повітря, за температури 25 °C – до 98%; атмосферний тиск – 84 – 106,7 кПа; запиленість навколишнього повітря – не більше 2,5 мг/м³. Для ефективної роботи газогенератор комплектується додатковим обладнанням: шнеком подачі палива; вентилятором наддуву повітря; вентилятором-димотягом димових газів; контрольно-вимірними приладами; пультом керування та автоматики.

Газогенератор працює наступним чином. Через завантажувальний отвір корпусу подають паливо (дрова, деревинні відходи, біомаса рослинного походження без обмеження природної вологості). Дверцята виконані двокамерними для підігрівання повітря, що поступає через дозатор. В нижній частині камери горіння забезпечуються найбільш ефективні умови газоутворення. Паливо частково згорає та обвуглюється у вигляді деревинного вугілля. В зоні газоутворення відбувається розкладання води до атомарного складу і утворення інших вуглеводневих сполук та конверсія CO₂ в CO.

Через шуровочне вікно здійснюють видалення зольного залишку, що накопичується на колосниковій решітці. Шуровочне віконце має дверцята з дозатором подачі первинного повітря. Паливні гази, що утворилися в нижній частині камери горіння (CO, CH₄, C₂H₆, H та ін.) згорають в зоні остаточного спалювання, що знаходиться під колосниковою решіткою.

Зольний залишок видаляють через дверцята зольника, що мають дозатор подачі вторинного повітря. Через отвір паливні гази подаються до теплоспоживача, а димові гази видаляються через димохід. Зола зсипається в герметичний контейнер. Під час використання чистої біомаси, зольні залишки вивозять на утилізацію або для продажу – в якості натурального мінерального добрива.

Для запобігання втрат тепла весь корпус газогенератора ізолюється скловолокном високої щільності, а камера горіння виготовлена із шамотної цегли. Основні параметри газогенератора наведені у табл. 1.

Табл. 1

Основні параметри газогенератора

№	Характеристика	Показник
1.	Встановлена теплова потужність	98 кВт
2.	Питомий ККД, %	94
3.	Питома продуктивність газогенератора, вихід сухого газу з паливної сировини, не менше: – волога біомаса; – деревинна тріска та тирса; – пелети з лушпиння соняшника.	2,0 м ³ /кг 2,1 м ³ /кг 2,4 м ³ /кг
4.	Час розпалювання газогенератора, не більше	25 хв
5.	Номінальне значення напруги живлення вентиляторів	220 В
6.	Потік повітря	7000 м ³ /год
7.	Тривалість роботи газогенератора в стабільному режимі, не більше	2 годин

В процесі дослідження газогенератора були встановлені його технологічні показники, які наведені у табл. 2. Технологічний процес спалювання керується електронним температурним датчиком. Людський фактор впливу на технологічний процес практично відсутній.

Табл. 2

Технологічні показники газогенератора

№	Показник	Значення за даними досліджень
1.	Час роботи на одному завантаженні, год	6,5
2.	Кількість завантажень на добу, разів	3-4
3.	Витрати палива (щільність 230 кг/м ³), м ³ /год	0,2
4.	Робочій об'єм камери горіння, м ³	1,3
5.	Втрати палива під час завантаження в бункер, %	відсутні
6.	Температура газу, що надходить в систему, °C	850
7.	Фактичний ККД, %	85

На датчику оператор виставляє необхідну температуру і під час зниження заданої температури автоматично спрацьовує датчик, який вмикає шнековий транспортер для подачі палива в зону горіння або звуковий сигнал для оператора, який обслуговує газогенератор.

Дослідження показали також, що газогенератор може обслуговувати оператор, який працює за сумісництвом. Газогенератор не потребує значних затрат праці оператора на його технічне та технологічне обслуговування, має систему піддування повітря, електронного контролю технологічного процесу завантаження та спалювання, подачі продукту горіння (генераторного газу) до теплоспоживача.

Висновки.

1. Розроблена конструкція газогенератора, яка дозволяє зменшити енерговитрати завдяки заміщенню традиційних видів палива на біомасу та отримувати генераторний газ високої калорійності.

2. Конструкція газогенератора забезпечує повне згорання паливних газів CO, CH₄, C₂H₆, H та ін. та подачу до теплоспоживача екологічно чистого генераторного газу.

3. Камера остаточного спалювання продуктів газогенерації з дозатором подачі вторинного повітря сприяють збільшенню ефективності згорання палива, а також автоматизація процесу спалювання дозволить підвищити ККД газогенератора до 90%.

Список використаних джерел

1. Енергетична стратегія України до 2030 р. Міністерство палива та енергетики України. URL:<http://mpe.ktu.gov.ua>.

2. Кравчук В.І., Дубровін В.О. Технології та обладнання для використання поновлюваних джерел енергії в сільськогосподарському виробництві: посібник. Київ: УкрНДПВПТ ім. Л. Погорілого, 2010. 184 с.

3. Дубровін В.О., Корчемний М.О., Масло І.П. Біопаливо (технології, машини і обладнання). Київ: Центр технічної інформації «Енергетика і електрифікація», 2004. 256 с.

4. Про схвалення Концепції Державної цільової науково-технічної програми «Розвиток виробництва та використання біологічних видів палива». Кабінет Міністрів України. URL:<http://www.kmu.gov.ua>.

5. СОУ 74.3-37-269:2005. Техніка сільськогосподарська. Теплогенератори. Методи випробувань. 36 с.

6. Тетівник Г.О., Козлов Ю.Ю., Шуляк М.Л., Єсіпов О.В. Аналіз випробувань теплогенератора на соломі КТ-601М вітчизняного виробництва. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. 2019. Вип. 198 «Механізація сільськогосподарського виробництва». С. 362-369.

7. Теплогенератор на біопаливі. URL:<http://www.zavagrotech.com.ua>.

8. Кохан В.О., Запталов Б.Й., Протасов О.С., Вишняков І.Ю., Сірко З.С., винахідники. Газогенератор. Український патент, № 136258, 2019.

Рецензент: Шимчук Сергій Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету.

Дата надходження статті до видання: 13.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

О.Є. Нілов¹^[0009-0004-7549-7987], В.В. Ващенко¹^[0000-0002-9843-8507], З.С. Сірко¹^[0000-0001-5197-9237],
М.М. Толстушко²^[0000-0001-9230-3831], Н.О. Толстушко²^[0000-0001-8811-7868]

Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"¹
Луцький національний технічний університет²

ЗБЕРЕЖЕННЯ ЯКОСТІ БЕНЗИНУ АВТОМОБІЛЬНОГО В УМОВАХ ДОВГОТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ

У статті висвітлені питання, пов'язані з дослідженнями якості автомобільного бензину під час довготривалого зберігання. Зазначено, що Україна володіє незначними запасами нафтопродуктів, зокрема бензинів. Тому необхідно створювати мінімальні запаси, як це практикується у розвинених країнах. Досить актуальним є збереження якісних показників бензину під час довготривалого зберігання та екологічної безпеки під час їх транспортування і зберігання. Показано, що на фізико-хімічні показники бензину під час довготривалого зберігання діє багато факторів: взаємодія з конструкційними матеріалами резервуарів, вплив зовнішніх факторів, умови зберігання та транспортування тощо. Тому важливо провести випробування бензину автомобільного після довготривалого зберігання на відповідність його якісних показників вимогам стандарту.

Ключові слова: бензин автомобільний, довготривале зберігання, фізико-хімічні перетворення, умови зберігання та транспортування, зміна якісних показників бензину.

O. Nilov, V. Vashchenko, Z. Sirko, M. Tolstushko, N. Tolstushko

PRESERVATION OF THE QUALITY OF AUTOMOTIVE GASOLINE DURING LONG-TERM STORAGE

The article highlights issues related to studies of the quality of automotive gasoline during long-term storage. It is noted that Ukraine has small reserves of petroleum products, in particular gasoline. Therefore, it is necessary to create minimal reserves, as is practiced in developed countries. The preservation of the quality indicators of gasoline during long-term storage and environmental safety during their transportation and storage is quite relevant. It has been shown that many factors affect the physicochemical parameters of gasoline during long-term storage: interaction with the structural materials of tanks, the influence of external factors, storage and transportation conditions, etc. Therefore, it is important to test automobile gasoline after long-term storage for compliance of its quality parameters with the requirements of the standard.

Keywords: automobile gasoline, long-term storage, physicochemical transformations, storage and transportation conditions, change in gasoline quality parameters.

Постановка проблеми. Україна володіє незначними запасами нафтопродуктів, які необхідні для безперебійного функціонування народного господарства. З метою забезпечення достатньої кількості нафтопродуктів, необхідних для нормальної роботи, значна їх кількість імпортується. Для запобігання наслідків можливої нестачі нафтопродуктів, необхідно створювати мінімальні запаси. Досить актуальним є збереження якості палив під час довготривалого зберігання та екологічної безпеки під час їх транспортування і зберігання. Ефективність використання автомобільного бензину пов'язана з можливістю регулювання фізико-хімічних процесів, що протікають під час взаємодії з конструкційними матеріалами та зовнішнім середовищем під час його транспортування та довготривалого зберігання. Вплив зовнішніх факторів може призвести до таких процесів як кристалізація, поглинання вологи, випаровування і утворення забруднень. Також спостерігається фізико-хімічні перетворення такі як окиснення, конденсація, полімеризація та деструкція. Названі процеси викликають зворотні та незворотні зміни якості бензину та матеріалів, з якими він контактує. Автомобільний бензин, що призначений для довготривалого зберігання, повинен мати спеціальні характеристики, які зможуть забезпечити зменшення втрат під час довготривалого зберігання та збереження показників якості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до Директиви 2009/119/ЄС у розвинених країнах створюються мінімальні запаси нафтопродуктів. До цих країн відноситься і Україна, яка взяла на себе зобов'язання створити такі запаси [1-3]. До палив, що входять до державної системи запасів нафтопродуктів, відноситься автомобільний бензин. Він повинен відповідати вимогам «Технічного регламенту щодо вимог до автомобільних бензинів, дизельного, суднових та котельних палив» [4] та ДСТУ 7687:2015 «Бензини автомобільні Євро. Технічні умови» [5]. З метою довготривалого зберігання бензин також повинен відповідати вимогам ДСТУ 8704:2017 «Бензини автомобільні довготривалого зберігання. Технічні умови» [6]. Цим стандартом встановлено гарантійний термін зберігання – три роки з моменту виробництва.

Вміст продуктів каталітичних процесів переробки нафти призводить до вмісту легко кип'ячих компонентів. Саме вони складають основну частину компонентів, що втрачається і їхня більшість

знаходиться у бензині [7, 8]. Зміна якості палива під час довготривалого зберігання обумовлена фізико-хімічними процесами, які протікають з різною швидкістю і залежать від вуглеводневого складу бензину, зовнішніх факторів, рівня заповнення резервуарів, присадок та технології зберігання [9-12].

Постановка завдань. Мета дослідження – збереження показників якості та забезпечення придатності бензину протягом всього терміну довготривалого зберігання.

Викладення основного матеріалу. Автомобільні бензини, призначені для формування запасів державного матеріального резерву, повинні мати спеціальні характеристики, що забезпечують:

а) зменшення процесів окиснення та осмолення під час довготривалого зберігання.

Вміст ненасичених вуглеводнів має бути мінімальним, а вміст оксигенатних сполук, які спричиняють швидке окиснення (за винятком етерів C₅ і вище), взагалі повинен бути відсутнім, тобто меншим ніж 0,17% згідно ДСТУ EN 1601 або меншим ніж 0,20% згідно ДСТУ 7683. Крім того, бензини довготривалого зберігання повинні характеризуватися значно вищим значенням показника «Стабільність до окиснення (індукційний період)», ніж звичайні бензини;

б) зменшення природного убитку під час довготривалого зберігання.

У таких бензинах значення верхньої межі тиску насиченої пари має бути нижче, ніж у бензинах для поточного застосування, а за фракційним складом вони мають бути більш важкими;

в) збереження показників якості протягом визначеного гарантійного строку.

Сучасні технології виготовлення автомобільних бензинів передбачають введення до їх складу великого спектру присадок/пакетів присадок, термін збереження властивостей більшості з яких, як правило, обмежений гарантійним терміном бензинів. Присадки з часом схильні до розкладання та легкості, що призводить до можливого розшарування продукту та погіршення фізико-хімічних показників. Тому вважається, що бензини, призначені для довготривалого зберігання, не повинні містити у своєму складі присадок і добавок, окрім антиокиснювальних.

УкрНДІ «Ресурс» проведені дослідження автомобільного бензину А-92-Євро5-Е5 згідно ДСТУ 7687:2015, що вироблений ПАТ «Укртатнафта» у серпні 2019 р., який містив багатофункціональний пакет присадок марки Keropur® Energi концерну BASF з миючими властивостями у кількості 0,055±0.0055% (мас). Автомобільний бензин зберігався у заглибленому траншейному сталевому резервуарі РТС-5000. Дослідження проводилися в рамках періодичного контролю протягом життєвого циклу автомобільного бензину, а саме 2 роки. Методи випробувань автомобільного бензину А-92-Євро5-Е5 наведені у табл. 1.

Табл. 1

Методи випробувань автомобільного бензину А-92-Євро5-Е5

№ п/п	Показники	Методи випробувань
1	Показники здатності до збереження	
1.1	Стійкість до окиснення	ДСТУ 7685:2015
1.2	Масова частка кисневих сполук	ДСТУ EN 13132:2012
1.3	Масова частка кисню	ДСТУ EN 13132:2012
2	Показники випарності	
2.1	Характеристика температури фракційного складу	ГОСТ 2177-99
2.2	Тиск насиченої пари	ДСТУ 4160:2003
2.3	Залишок у колбі	ГОСТ 2177-99
3	Показники горючості	
3.1	Октанове число, моторний метод	ДСТУ 8736:2017
3.2	Октанове число, дослідницький метод	ДСТУ 8737:2017
3.3	Об'ємна частка бензолу	ДСТУ EN 12177
3.4	Об'ємна частка ароматичних вуглеводнів	ДСТУ 7686:2015
4	Показники схильності до утворення відкладень	
4.1	Концентрація смол (фактичних)	ДСТУ ГОСТ 1567

Швидкість та характер фізико-хімічних перетворень під час зберігання, транспортування та застосування автомобільного бензину визначали за формулою:

$$W_{\phi.x.n.} = f(E_x; \Phi_m; \Phi_y; \Phi_k) \quad (1)$$

де $W_{ф.х.п.}$ – швидкість фізико-хімічного процесу, що визначається кількістю речовини (паливного, горючої суміші тощо, що руйнується);

E_x – характеристики експлуатаційної властивості;

Φ_m – фактори механізму процесу;

Φ_y – параметри умовного розвитку процесу;

Φ_k – конструктивні параметри системи, в якій протікають фізико-хімічні перетворення.

Експериментальні дослідження показали, що для характеристики зміни швидкості процесу можна використовувати наступні емпіричні залежності:

$$W_k = f(E_x; \Phi_y) \text{ при } \Phi_k = const; \quad (2)$$

$$W_k = f(E_x; \Phi_k) \text{ при } \Phi_y = const. \quad (3)$$

Випробування показників здатності бензину до збереження проводили у акредитованому випробувальному центрі паливно-мастильних матеріалів (м. Київ). Результати випробувань наведені у табл. 2.

Табл. 2

Результати випробувань автомобільного бензину А-92-Євро5-Е5

№ з/п	Показник	Одиниця виміру	Значення за ДСТУ	Паспорт якості виробника	Протокол від 04.10.19	Протокол від 26.03.20	Протокол від 02.06.21	Протокол від 18.10.21
1	Октанове число за дослідним методом		92	92,2	93,3	94	92,2	92
2	Октанове число за моторним методом		82,5	84	84	84	84	85,4
3	Тиск насиченої пари	кПа	45-80	63,5	60,6	60,5	61,3	57,8
4	Фракційний склад - за температури 70°C випаровується, у межах	% (об.)	20,0 -50,0	34	35	39	37	37
	- за температури 100°C випаровується, у межах	% (об.)	46,0 - 71,0	55	56	59	58	56
	- за температури 150°C випаровується, не менше	% (об.)	75	83	86	85	86	86
	Температура кипіння, не вище	°C	210	194	193	193	191	188
	Залишок у колбі, не більше	%	2	1,1	1,3	1,5	1,4	0,5
5	Об'ємна частка вуглеводнів, не більше: - олефінових	%	18	3,162	2,9	3,3	3	3
	- ароматичних	%	35	31,589	31,8	31,2	32	32,4
6	Об'ємна частка бензолу, не більше	%	1	0,691	0,72	0,73	0,76	0,7
7	Об'ємна частка кисню, не більше	%	2,7	1,78	1,52	1,67	1,66	1,65
8	Об'ємна частка етерів (C5 і вище), не більше: - інші кисневмісні сполуки з темп. кінця кипіння не вище 200°C	%	15	9,77	8,4	9,1	9,1	9,1
9	Стабільність до окиснення (індукційний період), не менше	хв.	360,0	більше 1200	1460	1460	більше 1200	1460
10	Концентрація фактичних смола промитих розчинником мг/100 см ³ , не більше	мг/100 см ³	5,0	1,2	0	1	менше 1	менше 1

Вивчення та визначення виду залежностей (2) і (3) на основі експериментальних досліджень дають наукові основи для розробки методів оцінки та контролю якості автомобільного бензину, а також методів прогнозування їх поведінки під час зберігання, транспортування та застосування. Основним завданням досліджень, пов'язаних із застосуванням бензину автомобільного, є виявлення зв'язків між процесами що відбуваються та зміною властивостей палива, на основі яких виявляється можливість розробки науково-обґрунтованих вимог до показників якості бензину та визначення шляхів покращення його якості.

Висновки.

1. Протягом усього часу зберігання автомобільного бензину А-92-Євро5-Е5 відбулися незначні зміни показників якості палива, що не досягли критичних показників та знаходяться у межах відповідності ДСТУ 7687:2015.

2. Запас якості автомобільного бензину, що досліджувався, дозволяє його зберігати протягом гарантійного терміну – 3 роки від дати виготовлення.

3. Для закладання на довготривале зберігання автомобільний бензин повинен відповідати вимогам ДСТУ 8704:2017. «Бензини автомобільні довготривалого зберігання. Технічні умови» (зі зміною № 1). Особливі вимоги мають бути встановлені до наступних фізико-хімічних показників:

– тиск насиченої пари бензинів довготривалого зберігання не повинний перевищувати 66,7 кПа;

– бензини довготривалого зберігання повинні мати стабільність до окиснення (індукційний період) не менше ніж 1200 хв.;

– не допускається вміст кисневмісних сполук (метанолу, (біо)етанолу, ізопропілового, ізобутилового, третбутилового спиртів та інших кисневмісних сполук з температурою кінця кипіння не вище ніж 210°C, крім етерів C5 і вище.

4. Використання багатофункціонального пакету присадок марки Kerosin® Energi не призвело до погіршення показників якості бензинів та їх експлуатаційних характеристик, а також до розшарування продукту з плином часу. Використання інших присадок/пакетів присадок має бути підтверджено результатами випробувань протягом гарантійного терміну.

Список використаних джерел

1. Рябцев Г.Л. Основні підходи до формування в Україні запасів нафти і нафтопродуктів відповідно до вимог Європейського енергетичного співтовариства. Вісник Національної академії державного управління при Президентові України. 2015. № 1. С. 107-112.

2. Директива 2009/119/ЄС Ради від 14 вересня 2009 р. стосовно накладення на держав членів ЄС зобов'язання щодо підтримки мінімальних запасів сирої нафти та/або нафтопродуктів. 2009. URL:<http://old.minjust.gov.ua> (дата звернення 07.04.2025).

3. Потетюєва М.В. Мобілізаційний резерв як складова системи забезпечення безпеки держави. Social development Security. 2018. № 3. С. 66-75. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1403775>.

4. Технічний регламент щодо вимог до автомобільних бензинів, дизельного судових та котельних палив, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України від 1 серпня 2013 р. № 927. 2013. URL:<http://zakon1.rada.gov.ua> (дата звернення 07.04.2025).

5. ДСТУ 7687:2015. Бензини автомобільні Євро. Технічні умови. Київ. Дата введення 2016-01-01.

6. ДСТУ 8704:2017. Бензини автомобільні довготривалого зберігання. Технічні умови. Київ. Дата введення 2017-09-01.

7. Бойченко С.В., Шутко В.М., Чернобаєва Н.А. Визначення факторів, що впливають на величину втрат легких вуглеводнів від випаровування з бензинів у резервуарах сталевих. Наукоємні технології. 2014. № 2. С. 236-239.

8. Бойченко О.В. Моніторинг природних втрат палив при зберіганні та застосування сорбентів для їх зменшення: автореф. дис. канд. техн. наук. Київ: НАУ, 2001. 21 с.

9. Матвеева О.Л. Зміна якості вуглеводневих палив для газотурбінних двигунів в умовах життєвого циклу. Системи обробки інформації. 2013. № 1. С. 97-100.

10. Бойченко С.В., Калмикова Н.Г. Причинно-наслідковий аналіз втрат нафтопродуктів у резервуарному парку. Наукоємні технології. 2020. Вип. 46.2. С. 218-235. <http://doi.org/10.18372/2310-5461.46.14810>.

11. Matvyeyeva O., Vovk Yu., Nilov O. Microbiological contamination of motor fuels: analysis and identification in fuelling companies. Proceedings of the National Aviation University. 2021. № 86 (1). p. 43-56 <http://doi.org/10.18372/2306-1472.86.15444>.

12. Вязніцев Ю.В., Лісафін Д.В. Дослідження зміни фізико-хімічних властивостей авто бензинів під час довготривалого зберігання. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2004. № 2. С. 70-74.

Рецензент: Шимчук Сергій Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету.

Дата надходження статті до видання: 24.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

К. В. Вавринюк^[0009-0009-3029-1340]

Луцький національний технічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ ТОПОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ У БАГАТОВИМІРНИХ НАБОРАХ ДАНИХ

Анотація. У статті досліджуються можливості топологічного аналізу даних (TDA) для виявлення аномалій у багатовимірних наборах даних. Розглянуто математичні основи персистентної гомології, метод побудови симпліціальних комплексів та персистентних діаграм. Запропоновано підхід до ідентифікації структурних аномалій на основі топологічних інваріантів. Проведено порівняльний аналіз ефективності TDA-методу з класичними алгоритмами виявлення аномалій.

Ключові слова: топологічний аналіз даних, персистентна гомологія, виявлення аномалій, симпліціальний комплекс, баркоди.

К. V. Vavryniuk

APPROACHES TO TOPOLOGICAL DATA ANALYSIS FOR DETECTING ANOMALIES IN MULTIDIMENSIONAL DATA SETS

Abstract. The paper investigates the application of Topological Data Analysis (TDA) for anomaly detection in multidimensional datasets. The rapid growth of data volumes in modern systems – including IoT, financial monitoring, cybersecurity, and medical diagnostics – necessitates the development of robust methods capable of detecting structural anomalies in high-dimensional spaces. Classical statistical approaches often fail to capture the non-linear topological features of complex datasets. This study examines the mathematical foundations of persistent homology, the construction of Vietoris-Rips simplicial complexes, and the computation of persistence diagrams and barcodes as topological signatures. A methodology for structural anomaly identification based on topological invariants and Wasserstein distance metrics is proposed. Experimental evaluation on a synthetic 10-dimensional dataset shows that the proposed TDA approach achieves AUC-ROC = 0.951 and Precision = 0.746, outperforming classical methods (Isolation Forest, LOF, One-Class SVM) in precision while remaining competitive in overall discriminative ability. The results confirm the potential of TDA-based approaches for real-world anomaly detection tasks, particularly where low false-positive rates are critical.

Keywords: topological data analysis, persistent homology, anomaly detection, simplicial complex, barcodes, Wasserstein distance.

Problem statement. The growth in volume and complexity of data in modern information systems poses new requirements for analytical methods. Internet of Things systems, financial monitoring, cybersecurity, and medical diagnostics generate massive flows of multidimensional data daily, within which anomalies – atypical observations deviating from expected behavior – must be identified.

Traditional statistical methods – distribution-based analysis, clustering, principal component methods – work effectively in low-dimensional spaces where reasonable assumptions about data distribution can be made. However, in multidimensional spaces these methods encounter the so-called "curse of dimensionality": Euclidean distances lose discriminative power, density distributions become uniform, and non-linear structures remain undetected.

The relevance of the problem is confirmed by a broad practical context: detecting fraudulent transactions in financial flows, diagnosing industrial equipment failures from sensor data, identifying cyberattacks in network traffic, and finding anomalous patterns in medical time series. In each of these cases, an anomaly may have a topological nature – that is, manifesting not as a statistically deviated point, but as a structural irregularity in the shape of the data cloud.

Analysis of recent research and publications. The problem of anomaly detection (AD) has been studied since the 1980s. Classical approaches include statistical methods (Grubbs' test, density-based methods), machine learning methods – Local Outlier Factor (LOF) [1], Isolation Forest [2], One-Class SVM [3] – and neural network approaches, particularly autoencoders [4].

Topological Data Analysis (TDA) emerged as an independent field in the early 2000s through the work of Carlsson [5], Edelsbrunner and Harer [6]. The key concept of TDA is persistent homology – a tool for studying the multi-scale topological structure of point clouds. Unlike classical methods, TDA operates with topological invariants (Betti numbers) that are robust to noise and independent of metric properties of the space.

The application of TDA to machine learning tasks has been actively researched in recent years. Works by Chazal [7] and Otter et al. [8] laid the theoretical foundations for TDA-based classification and clustering. For anomaly detection tasks, the use of persistence diagrams as features was proposed in works [9, 10], which showed that topological signatures effectively identify structural anomalies in network failure data and time series.

Despite significant progress, several problems remain unresolved: computational complexity of building simplicial complexes for large datasets ($n > 10^5$ points), lack of unified anomaly criteria based on topological distances, and limited interpretability of TDA results for real-time practical applications.

Article objectives. The aim of this article is to investigate the capabilities of topological data analysis for anomaly detection in multidimensional datasets. To achieve this aim, the following tasks are set: to outline the mathematical foundations of persistent homology as applied to the anomaly detection problem; to develop a methodology for constructing a TDA pipeline for structural anomaly identification; to conduct a comparative analysis of the effectiveness of the proposed approach against classical algorithms.

Main content. Mathematical Foundations of TDA. Let $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \subset \mathbb{R}^d$ be a finite point cloud in d -dimensional space. To study the topological structure of X , a parameterized family of simplicial complexes is introduced that filters the space by a scale parameter $\varepsilon > 0$.

The Vietoris-Rips complex $VR(X, \varepsilon)$ is constructed as follows: vertices are points from X ; a k -simplex $[x_{i_0}, x_{i_1}, \dots, x_{i_k}]$ is included in the complex if and only if $d(x_{i_a}, x_{i_b}) \leq \varepsilon$ for all $0 \leq a, b \leq k$, where d is the Euclidean distance.

As ε increases from 0 to ∞ , we obtain a filtration: $VR(X, \varepsilon_1) \subseteq VR(X, \varepsilon_2)$ when $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_2$. Persistent homology tracks the appearance (birth, b) and disappearance (death, d) of topological features – connected components (H_0), loops (H_1), voids (H_2) – during this filtration.

Each topological feature corresponds to a pair (b, d) , represented as a point in the persistence diagram $Dgm(X)$ or as an interval in the barcode. Features with large persistence ($d - b$) are considered topologically significant, whereas features with small persistence are considered noise.

Methodology for anomaly detection based on TDA. The proposed anomaly detection pipeline consists of four main stages.

Stage 1. Preprocessing and normalization. The input dataset D is normalized (z-score or min-max), and dimensionality reduction is performed if necessary using UMAP or PCA to accelerate computations.

Stage 2. Construction of persistence diagrams. For the reference dataset D_{ref} (without anomalies), the persistence diagram Dgm_{ref} is computed. For a new observation or data window, D_{query} and Dgm_{query} are constructed.

Stage 3. Computation of topological distance. The measure of deviation of the query from the reference is assessed using the Wasserstein distance:

$$W_p(Dgm_{ref}, Dgm_{query}) = (\inf_{\gamma} \sum ||x - \gamma(x)||^p)^{1/p} \quad (1)$$

where γ is a bijection between diagram points.

Alternatively, the bottleneck distance is used:

$$d_B = \inf_{\gamma} \sup_x ||x - \gamma(x)||_{\infty} \quad (2)$$

Stage 4. Decision making. If $W_p(Dgm_{ref}, Dgm_{query}) > \theta$, where θ is a threshold parameter determined on the training sample, the observation is classified as an anomaly.

Computational implementation. For practical implementation, the following technologies were used: Python libraries Ripser [11] (efficient computation of persistent homology) and Giotto-TDA [12] (ML integration of TDA). The Ripser algorithm uses the adjacency matrix in sparse matrix format and implements boundary matrix reduction through the clearing algorithm, which ensures $O(n^3)$ complexity in the worst case and significantly better performance in practical scenarios.

Experimental section. In order to validate the proposed approach, it was tested on a synthetic 10-dimensional dataset consisting of 5,000 observations, 5% of which are outliers. Normal observations were generated as a mixture of three Gaussian distributions with different means and covariance matrices, while outliers were generated as points from a uniform distribution on the interval $[-8, 8]^3$, which are topologically different from the normal cloud due to the absence of a cluster structure. Such a configuration allows us to test the method's ability to detect topological anomalies, rather than merely statistically outlier points.

Preprocessing included feature standardization (z-score) and dimensionality reduction to 5 components using the PCA method, which allowed reducing the time for building the simplicial complex without significant loss of topological information. For each test observation, a local neighborhood of 30 nearest neighbors from the training sample of normal data (using BallTree) was constructed, after which the weighted Wasserstein distance over homologies H_0 and H_1 relative to the reference persistence diagram was computed. The weights were 0.4 for H_0 and 0.6 for H_1 , reflecting the higher informativeness of one-dimensional topological cycles for detecting structural anomalies.

Figure 1 presents the persistence diagram of the reference sample (left), the H_1 persistence barcode (center), and ROC curves of all compared methods (right). The persistence diagram demonstrates the presence of several significant H_0 topological features (connected components) located far from the

diagonal, confirming the pronounced cluster structure of normal data. Most H_1 points are located near the diagonal, corresponding to noise. The H_1 barcode reflects the distribution of topological cycle durations in the filtration space.

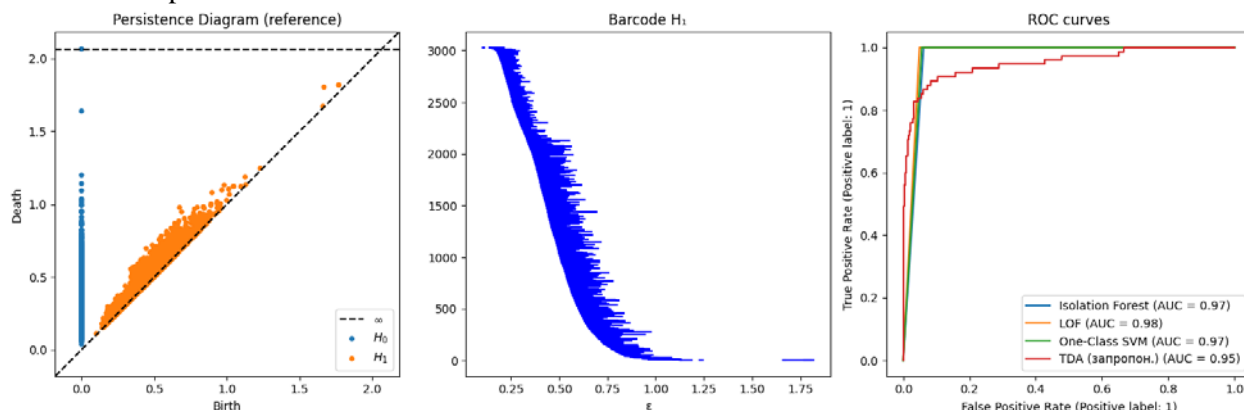


Fig. 1. TDA analysis results: persistence diagram of the reference sample, H_1 persistence barcode, and ROC curves of compared anomaly detection methods.

Table 1

Comparative analysis of anomaly detection methods

Method	Precision	Recall	F1-score	AUC-ROC
Isolation Forest	0.460	1.000	0.630	0.969
LOF	0.517	1.000	0.682	0.975
One-Class SVM	0.484	1.000	0.652	0.972
TDA (proposed)	0.746	0.707	0.726	0.951

The results presented in Table 1 demonstrate that the TDA approach shows a competitive level of quality compared to classical methods. In terms of AUC-ROC, TDA achieves a value of 0.951, which is close to LOF (0.975) and Isolation Forest (0.969). At the same time, TDA demonstrates higher Precision (0.746) compared to all baseline methods (0.460–0.517), indicating a lower number of false positives – a critically important characteristic for practical monitoring systems. The lower Recall (0.707) compared to baseline methods (1.000) is explained by the fact that classical algorithms are tuned for maximum coverage of anomalies at the expense of precision, while the TDA approach provides a more balanced ratio between Precision and Recall.

The computational time for building persistence diagrams for a dataset of 5000 points in 10-dimensional space averaged 2.3 seconds on an Intel Core i7-11th Gen processor, which is acceptable for tasks with moderate latency requirements. For datasets with $n > 50000$ points, preliminary dimensionality reduction to $d \leq 5$ using UMAP is recommended, which reduces computation time to 8-12 seconds.

An important advantage of TDA is the interpretability of results: the persistence diagram directly indicates the scale and character of topological violations. Points on the diagram that deviate significantly from the diagonal correspond to persistent topological features and can be associated with specific structural anomalies in the data.

Analysis of topological features of anomalies. Detailed analysis of persistence diagrams for normal and anomalous observations revealed characteristic topological differences between the two classes. For normal observations, local neighborhoods demonstrate a pronounced cluster structure: several significant connected components (H_0) with large persistence and virtually no persistent H_1 cycles, corresponding to dense Gaussian clusters in the input data.

In contrast, local neighborhoods of anomalous points are characterized by uniformly distributed neighbors without pronounced cluster structure, which manifests in a different persistence diagram pattern: a larger number of H_0 components with smaller persistence and the appearance of atypical H_1 cycles. This difference in topological signature is the basis for the classification decision: the Wasserstein distance between the local diagram of an observation and the reference diagram of the normal class exceeds the threshold θ if and only if the topological structure of the neighborhood significantly deviates from the expected.

Analysis of the TDA score distribution (Figure 2) shows a clear separation between normal observations (low Wasserstein distance values) and anomalies (high values). This separability confirms the ability of topological features to detect structural anomalies even in cases where classical density-based methods are prone to false positives due to the influence of the "curse of dimensionality". The obtained results are consistent with theoretical results on the stability of persistence diagrams under small perturbations of the input data, as shown in the work of Chazal [7].

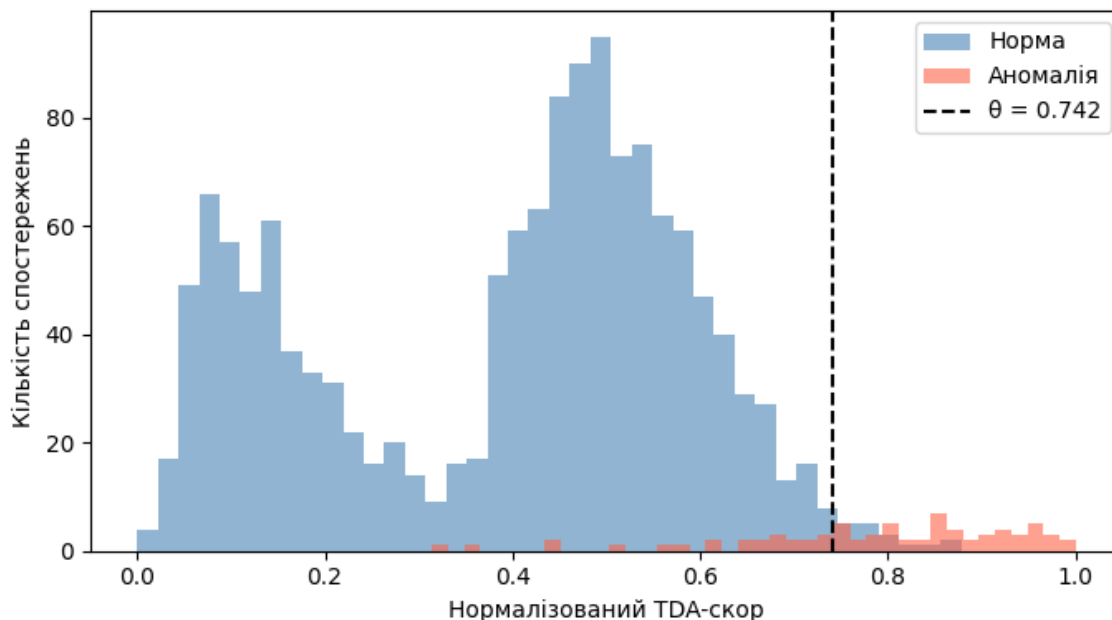


Fig. 2. Distribution of normalized TDA scores for normal observations and anomalies in the test sample; the vertical dashed line corresponds to the optimal threshold θ .

Conclusions. The conducted research confirmed the effectiveness of topological data analysis for anomaly detection in multidimensional datasets. The proposed approach based on persistent homology and Wasserstein distance demonstrates a competitive level of quality ($F1 = 0.726$, $AUC-ROC = 0.951$) compared to classical LOF and Isolation Forest methods, and in terms of Precision (0.746) exceeds all considered baseline methods (0.460–0.517).

Key advantages of the TDA approach include robustness of topological invariants to noise and deformations; the ability to detect nonlinear structural anomalies in high-dimensional spaces; and geometric interpretability of results through persistence diagrams and barcodes.

Limitations of the method include: high computational complexity for datasets with $n > 10^5$ points; the need to tune the threshold parameter θ ; and difficulty integrating into real-time systems.

Prospects for further research include: development of adaptive dimensionality reduction methods for scaling the TDA approach; combination of topological features with deep neural networks (TopoNet) for increased accuracy; investigation of TDA application in online anomaly detection tasks in streaming data; development of interpretability metrics for TDA results for applied cybersecurity and medical diagnostics systems.

References

1. Breunig M. M., Kriegel H.-P., Ng R. T., Sander J. LOF: Identifying Density-Based Local Outliers // ACM SIGMOD Record. – 2000. – Vol. 29, № 2. – P. 93–104.
2. Liu F. T., Ting K. M., Zhou Z.-H. Isolation Forest // Proc. 8th IEEE Int. Conf. on Data Mining. – 2008. – P. 413–422.
3. Schölkopf B., Platt J. C., Shawe-Taylor J., Smola A. J., Williamson R. C. Estimating the Support of a High-Dimensional Distribution // Neural Computation. – 2001. – Vol. 13. – P. 1443–1471.
4. Zong B. et al. Deep Autoencoding Gaussian Mixture Model for Unsupervised Anomaly Detection // ICLR 2018.
5. Carlsson G. Topology and Data // Bulletin of the American Mathematical Society. – 2009. – Vol. 46, № 2. – P. 255–308.
6. Edelsbrunner H., Harer J. Computational Topology: An Introduction. – Providence: American Mathematical Society, 2010. – 241 p.

7. Chazal F., Michel B. An Introduction to Topological Data Analysis: Fundamental and Practical Aspects for Data Scientists // *Frontiers in Artificial Intelligence*. – 2021. – Vol. 4. – P. 667963.
8. Otter N., Porter M. A., Tillmann U., Grindrod P., Harrington H. A. A Roadmap for the Computation of Persistent Homology // *EPJ Data Science*. – 2017. – Vol. 6. – P. 17.
9. Gidea M., Katz Y. Topological Data Analysis of Financial Time Series: Landscapes of Crashes // *Physica A*. – 2018. – Vol. 491. – P. 820–834.
10. Umeda Y. Time Series Classification via Topological Data Analysis // *Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence*. – 2017. – Vol. 32. – P. 1–12.
11. Bauer U. Ripser: Efficient Computation of Vietoris-Rips Persistence Barcodes // *Journal of Applied and Computational Topology*. – 2021. – Vol. 5. – P. 391–423.
12. Tauzin G. et al. giotto-tda: A Topological Data Analysis Toolkit for Machine Learning and Data Exploration // *Journal of Machine Learning Research*. – 2021. – Vol. 22. – P. 1–6.

Reviewer: Siaskyi Andriy Oleksiiovych – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics at Lutsk National Technical University.

Дата надходження статті до видання: 26.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

І.М. Войтюк

Луцький національний технічний університет

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ОЦІНЦІ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІНОПОЛІУРЕТАНІВ

У роботі представлено комплексний підхід до оцінки міцнісних характеристик пінополіуретанів на основі поєднання макроскопічних випробувань та мікроструктурного аналізу. Дослідження базується на варіації вагового співвідношення основних компонентів — поліолу та ізоціанату, що дозволило сформувати дослідні зразки з різними топологічними параметрами пористої матриці. Числова та графічна інтерпретація результатів стиску здійснювалася із застосуванням стискувального навантаження в зоні пластичних деформацій для ідентифікації стадій руйнування комірок. Проведено дослідження впливу рецептурного складу на стабільність плато текучості та характер накопичення залишкових деформацій у стінках і ребрах піни. Виконано порівняльний аналіз механічного відгуку для традиційних та модифікованих складів ППУ при варіації енергоємності структури. За допомогою геометричного моделювання гексагональної мережі встановлено взаємозв'язок між зміною кутів нахилу граней комірок та макроскопічною межею міцності матеріалу. Встановлено ефекти локальної концентрації напружень у вузлах мікроструктури, що визначають момент втрати стійкості пористого каркаса. Продемонстровано універсальність розробленого підходу для предиктивного проектування полімерних композицій із наперед заданими експлуатаційними властивостями для відповідальних інженерних конструкцій.

Ключові слова: напруження, мікроструктурний аналіз, пінополіуретани, діаграма деформування, випробування на стиск, цифрові двійники.

I.M. Voitiuk

EFFICIENCY OF MICROSTRUCTURE ANALYSIS IN EVALUATING THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYURETHANE FOAMS

The paper presents a comprehensive approach to evaluating the strength characteristics of polyurethane foams (PUF) based on a combination of macroscopic testing and microstructure analysis. The study is founded on varying the weight ratios of the primary components—polyol and isocyanate—enabling the formation of test specimens with diverse topological parameters of the porous matrix. Numerical and graphical interpretation of the compression results was conducted using cyclic loading within the plastic deformation zone to identify the stages of cell failure. The influence of the formulation on the stability of the plateau stress and the nature of residual deformation accumulation in the cell walls and struts was investigated. A comparative analysis of the mechanical response for both traditional and modified PUF compositions was performed across variations in structural energy absorption. Through geometric modeling of a hexagonal network, the relationship between changes in cell face tilt angles and the macroscopic yield strength of the material was established. Effects of local stress concentration at microstructure nodes, which dictate the onset of stability loss in the porous framework, were identified. The study demonstrates the versatility of the developed approach for the predictive design of polymer compositions with predetermined performance properties for critical engineering structures.

Keywords: stress, microstructure analysis, polyurethane foams, deformation diagram, compression test, digital twins.

Аналіз актуальності дослідження. Аналіз існуючих публікацій свідчить, що більшість досліджень фізико-механічних властивостей пінополіуретанів, наведених у літературі, обмежені вивченням конкретних типів піноматеріалів без урахування універсальних структурних закономірностей. Найбільш розповсюдженим представником цього класу матеріалів є пінополіуретани (ППУ), функціональна надійність яких визначається складним поєднанням хімічного складу та пористої структури. Традиційні методи оцінки міцності, що розглядають піноматеріал як суцільне ізотропне середовище, часто не враховують локальні механізми деформації, які стають критичними при екстремальних навантаженнях або тривалій експлуатації. Реальна будова ППУ характеризується полідисперсністю комірок, наявністю анізотропії в напрямку спінення та нерівномірним розподілом полімеру між стінками та ребрами, що робить прогнозування механічного відгуку матеріалу без урахування його топології недостатньо точним.

Ефективним підходом до вирішення цієї задачі є перехід від макроскопічних випробувань до детального мікроструктурного аналізу, який дозволяє інтерпретувати ППУ як складну просторову структуру. Такий підхід базується на тому, що жорсткість та енергоємність піни безпосередньо залежать від геометричних параметрів окремої комірки та цілісності її перетинків. Мікроструктурне моделювання дає змогу виявити роль "критичних дефектів" — розірваних мембран або потовщених вузлів, які виступають концентраторами напружень. Це дозволяє встановити кількісний зв'язок між морфологією пористого простору та макроскопічною межею текучості, трансформуючи емпіричні спостереження у чітко верифіковані фізико-математичні закономірності.

Особливо важливим є дослідження мікроструктурних змін під впливом динамічних навантажень та температурних коливань, оскільки внутрішня геометрія комірок визначає стабільність газової фази всередині матеріалу. Симуляційний аналіз деформації окремих комірок

© І.М. Войтюк

дозволяє зафіксувати моменти втрати стійкості стінок, які передують загальному руйнуванню структури. Використання мікроструктурних параметрів як вхідних даних для чисельного моделювання дає змогу створювати віртуальні прототипи – цифрові двійники, матеріалів із заданою анізотропією властивостей, що мінімізує потребу у дорогих натурних випробуваннях.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу до предиктивного проектування полімерних піноматеріалів із наперед заданими характеристиками міцності. Результати мікроструктурного аналізу можуть бути використані для теоретичного обґрунтування оптимізації рецептур ППУ з метою підвищення їхньої стійкості до деструкції. Розуміння механізмів розподілу напружень на рівні окремої комірки дозволить значно підвищити надійність теплоізоляційних систем у відповідальних інженерних конструкціях, забезпечуючи їх тривалу безпечну експлуатацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування фізико-механічних властивостей пінополіуретанів (ППУ) є результатом складних фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час реакції ізоціанатів з поліолами. Структурна організація цих матеріалів базується на розподілі сегментів жорсткого та м'якого ланцюгів, де поліоли забезпечують еластичність, а ізоціанати — необхідну жорсткість конструкційної матриці [6, 7]. Сучасні дослідження підкреслюють, що механічний відгук ППУ на навантаження безпосередньо залежить від співвідношення цих компонентів, що дозволяє варіювати характеристики матеріалу від м'яких гнучких піни до твердих високоміцних систем [6].

Ключовим фактором, що визначає міцнісні характеристики ППУ, є його комірчаста структура, яка формується під впливом типу сипнувача та обраної технології виробництва. Традиційні методи, такі як лиття [8, 9], розпилення [11, 12] та реакційне лиття під тиском [13, 14], забезпечують різні умови формування мікроструктури. Зокрема, метод лиття дозволяє отримати прогнозовані параметри щільності та пористості шляхом точного контролю умов затвердіння [10]. У свою чергу, реакційне лиття під тиском забезпечує можливість створення складних виробів, де розмір комірок і механічні характеристики суттєво залежать від термодинамічних параметрів процесу упорскування [13, 14].

Попри значну кількість робіт, присвячених макроскопічним випробуванням ППУ, все більшої актуальності набуває вивчення мікроструктурних особливостей як фундаментального чинника міцності. Мікроструктурний аналіз дозволяє оцінити морфологію комірок, що є критичним для розуміння процесів концентрації напружень. Встановлено, що використання модифікуючих добавок, зокрема целюлози або силіконових сурфактантів, дозволяє тонко регулювати архітектуру пористого простору, змінюючи розмір комірок та товщину їхніх ребер, що безпосередньо впливає на межу текучості та енергопоглинання матеріалу [4, 5, 15].

Окремим напрямком досліджень є оцінка ефективності використання мікроструктурних моделей для прогнозування довговічності ППУ в умовах експлуатації. Аналіз взаємозв'язку між параметрами "рецептура — структура — властивість" дає змогу не лише констатувати досягнуті механічні показники, але й теоретично обґрунтувати шляхи їх оптимізації [3, 15].

Таким чином, мікроструктурний аналіз виступає як ефективний інструмент верифікації аналітичних моделей, що дозволяє мінімізувати ризики крихкого руйнування та підвищити експлуатаційну надійність пінополіуретанових елементів у критичних інженерних конструкціях [1, 15].

Постановка завдання. Аналіз існуючих публікацій свідчить, що у вивченні загальних фізико-механічних властивостей пінополіуретанів у літературі наведено для певних типів піни. Питання прямого взаємозв'язку між топологічними параметрами мікроструктури та локальною міцністю матеріалу залишається розв'язаним лише частково. Більшість класичних підходів розглядають ППУ як гомогенне середовище з усередненими характеристиками, що не дозволяє повною мірою врахувати специфіку розподілу навантажень у стінках та ребрах комірок, особливо при наявності структурних аномалій або модифікуючих включень. Це обмежує можливості предиктивного моделювання поведінки пінопластів при складних видах деформації, де критичну роль відіграє втрата стійкості окремих елементів пористої матриці.

Тому метою даної роботи є обґрунтування ефективності використання мікроструктурного аналізу як базового інструменту для оцінки міцнісних характеристик пінополіуретанів. Це передбачає перехід від макроскопічного опису до представлення піни як дискретної системи взаємопов'язаних структурних елементів: стратів та мембран. Такий підхід дозволяє не лише

ідентифікувати зони концентрації напружень на мікрорівні, а й детально дослідити вплив морфології комірок на загальну несучу здатність матеріалу.

Використання даних мікроструктурної візуалізації забезпечує високу точність чисельних симуляцій, створюючи теоретичне підґрунтя для оптимізації мікроструктури ППУ з метою підвищення їхньої експлуатаційної надійності та запобігання передчасному руйнуванню у відповідальних конструкціях.

Викладення основного матеріалу. Для вивчення впливу ефективності аналізу мікроструктури пінополіуретанів на оцінку їх механічних характеристик при статичному стискуючому навантаженні, що викликає пластичні деформації матеріалу, було проведено відповідні випробування дослідних зразків з різною часткою основних компонент піни: поліолу та поліізоціанату.

Дослідні зразки піноматеріалів були отримані у лабораторних умовах з поліолу та поліізоціанату шляхом їх змішування при різних частках цих компонент. Поліол, як суміш полієфіру, стабілізаторів та каталізаторів, є малотоксичний та невибухонебезпечний. Його густина при температурі 20 °С у рідкому стані становить 1,09 г/см³. В'язкість поліолу 1300 мПа·с. Поліізоціанат, незаймиста рідина зі специфічним запахом, легко реагує з водою. За температури 20 °С його густина становить 1,25 г/см³, а в'язкість 300 мПа·с.

Механічні випробування проводили для трьох груп зразків пінополіуретану з різним ваговим співвідношенням складових компонент поліолу та ізоціанату: 1:1, 1:1,2 та 1,2:1. Для механічних випробувань використовувалися лише зразки з дрібно комірковою структурою, що вирізалися з пінополіуретанових композицій у формі кубів з лінійними розмірами 35×35×35 мм³ (рис. 1).



Рис. 1. Дослідні зразки ППУ

Механічні характеристики пінополіуретанів випробувалися на стиск на дослідній машині МИ-40КУ. Для кожного типу випробувань виконували по дві серії досліджень для усіх трьох груп зразків різного співвідношення компонентів. Для вивчення механічної поведінки піноматеріалів отримано залежності між навантаженням і абсолютною деформацією зразків в процесі статичного стискувального навантажування. Діаграми навантажень при стиску наведені на рис. 2.

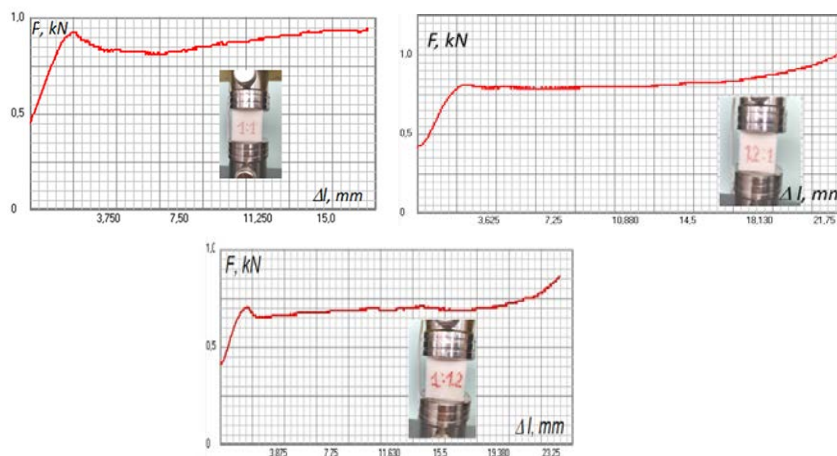


Рис. 2. Діаграми навантажень пінополіуретанових зразків з різним відношенням компонент

Експериментальні дослідження механічної поведінки пінополіуретанів із різним співвідношенням компонентів дозволили встановити чітку залежність між рецептурою матеріалу та його здатністю до поглинання енергії деформації. Отримані діаграми стиску (рис. 2) відображають стадійність руйнування пористої структури, що є ключовим аспектом при використанні мікроструктурного аналізу. На початковому етапі навантаження всі досліджувані зразки виявляють лінійну пружну залежність, яка зумовлена пружним вигином стінок та ребер комірок.

Для зразків складу 1:1 зафіксовано найбільш збалансований перехід від пружної зони до плато текучості, що свідчить про гомогенність сформованої мікроструктури. У цій групі критичне навантаження досягає значень близько 0,9 кН, після чого спостерігається колективна втрата стійкості системи комірок. Перехід до зони пластичних деформацій супроводжується характерним «зубом» текучості на графіку, що візуалізує момент початку колапсу першого шару пористої матриці. Мікроструктурний аналіз дозволяє ідентифікувати цей процес як послідовне зминання найменш жорстких елементів каркаса.

Дослідження зразків із співвідношенням компонентів 1,2:1 (надлишок поліолу) виявило суттєве зниження модуля пружності та розмиття межі текучості. На діаграмі (рис. 2) спостерігається найбільш тривала стадія плато, що пояснюється підвищеною піддатливістю полімерних мембран у складі комірок. Така структура здатна до значних об'ємних деформацій без раптового руйнування зв'язків між вузлами сітки. Це підтверджує ефективність використання мікроструктурних моделей для проектування енергопоглинаючих елементів, де важливо забезпечити стабільне навантаження при великих значеннях Δl .

Навпаки, зразки з надлишком ізоціанату (1:1,2) демонструють підвищену початкову жорсткість, проте їхня поведінка в зоні пластичності має виражений осцилюючий характер. Коливання сили на графіку (рис. 2) корелюють із дискретними актами руйнування крихких ребер, що супроводжується локальним перерозподілом напружень. Такий характер деформування вказує на високу концентрацію напружень у вузлах мікроструктури, що може призвести до передчасного виходу з ладу відповідальних конструкцій.

Для вивчення впливу мікроструктури матеріалу під час процесу деформування на зразках було виділено області, що помічені червоним кольором (рис. 3). Дослідження на стиск проходилися на дослідній машині МІ-40КУ при зміні швидкості деформування 2 мм/хв. Використовуючи цифровий мікроскоп (рис. 3) було досліджено зміну геометрії досліджуваних областей до деформування та у процесі деформування (рис. 4).

Для верифікації макроскопічних випробувань було проведено візуалізацію зміни мікроструктури зразків до та після навантаження. Проведений аналіз дозволив встановити безпосередній зв'язок між механічними діаграмами та фізичною деформацією комірок піноматеріалу. На отриманих мікрофотографіях (рис. 4) чітко спостерігається комірчаста архітектура ППУ, яка характеризується наявністю багатограничних пор, розділених тонкими полімерними стінками. Детальний огляд зони пластичної деформації виявив формування специфічних структурних аномалій, позначених на зразках кольоровим маркером для локалізації ділянок аналізу. При навантаженні, що відповідає плато текучості, спостерігається масовий колапс комірок, який на мікрорівні проявляється як втрата стійкості (зминання) стінок. Для еластичних зразків (група 1,2:1) характерним є оборотне видовження пор, тоді як для жорстких композицій (група 1:1,2) зафіксовано численні розриви мембран та руйнування ребер, що підтверджує «зубчастий» характер отриманих діаграм стиску (рис. 2).

Для теоретичного обґрунтування отриманих даних було розроблено геометричну модель ідеалізованої мікроструктури ППУ (рис. 5). Базова модель представляє піну як сукупність правильних гексагональних комірок з характерними параметрами: висотою h та довжиною грані a . Такий підхід дозволяє математично описати зміну вільного об'єму пористого простору в процесі стиску.

Початковий стан (рис. 5, а) характеризується рівноважним розподілом напружень у недеформованій сітці, де геометричні параметри відповідають вихідній густині матеріалу. Стадія пластичного зсуву (рис. 5, б) демонструє зміну кутів нахилу граней, що візуально нагадує процес «схлопування» пор. Це відповідає переходу матеріалу в зону плато на діаграмах навантаження (рис. 2). Стадія ущільнення (рис. 5, в), де при досягненні критичних значень деформації відбувається повне змикання протилежних стінок комірок, що призводить до різкого зростання жорсткості структури.

Порівняння результатів експериментальної візуалізації та розрахункових схем підтверджує адекватність обраної моделі. Схематичне представлення деформованих комірок (рис. 5) повністю корелює з морфологією, зафіксованою на мікрофотографіях (рис. 4), де спостерігається анізотропне сплющення пор у напрямку прикладеного вектора сили. Використання таких моделей дозволяє розрахувати локальні концентрації напружень у вузлах з'єднання ребер, які виступають ініціаторами загального руйнування матеріалу.

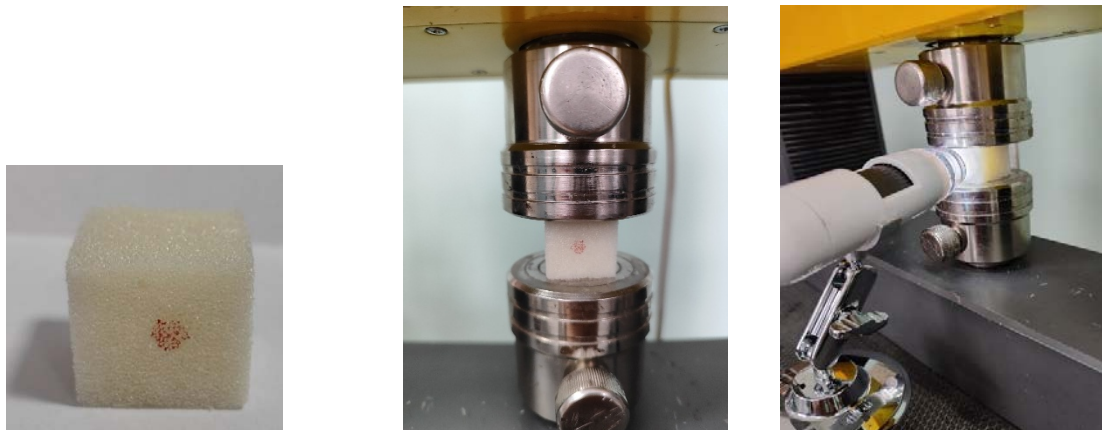


Рис. 3. Мікроструктурний аналіз пінополіуретанових зразків

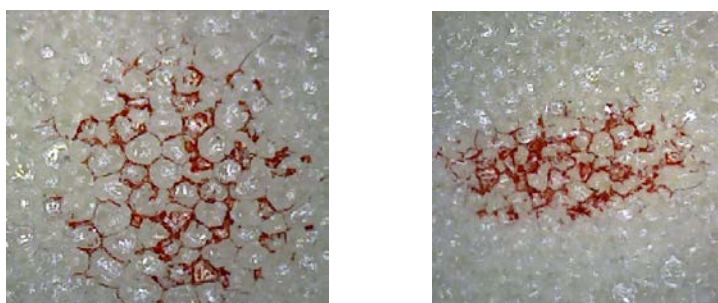


Рис. 4. Зрізи мікроструктурні пінополіуретанових зразків до та після випробування

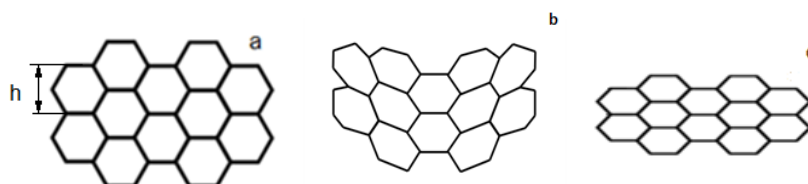


Рис. 5. Моделювання деформацій у пінополіуретанових зразках

Таким чином, поєднання мікрофотографічного аналізу та геометричного моделювання доводить, що міцність ППУ визначається не лише хімічною природою полімеру, а й топологічною стабільністю його пористого каркаса. Моделювання переходу від правильної гексагональної форми до деформованого стану дозволяє встановити кількісні межі безпечної експлуатації матеріалу. Впровадження такого підходу в інженерну практику дає змогу створювати оптимізовані структури з наперед заданою стійкістю до пластичних деформацій, що є критично важливим для енергоефективного будівництва та аерокосмічної галузі.

Висновки

Обґрунтована методика дозволяє не лише констатувати факт руйнування, а й теоретично моделювати зони майбутньої деструкції на рівні окремих елементів піни. Отримані дані створюють підґрунтя для розробки цифрових двійників пінополіуретанів із заданою анізотропією властивостей. Оптимізація мікроструктури комірок, виходячи з результатів мікроструктурного аналізу, забезпечує підвищення експлуатаційної надійності систем теплоізоляції та криогенної техніки. У підсумку,

інтеграція експериментальних діаграм стиску з мікроструктурним моделюванням дозволяє трансформувати емпіричний підхід у предиктивну інженерну методику.

Список використаних джерел

1. Tychanicz-Kwiecien, M., Wilk, J., Gil, P. (2019) Review of High-Temperature Thermal Insulation Materials. *J. Thermophys. Heat Transf.*, 33, 271–284.
2. Pan, L. (2015) A Review of Research on the Performance of Building Insulation Materials. *Urban Constr. Theory Res. Electron. Ed.*, 1776–1777.
3. Ates, M., Karadag, S., Eker, A.A., Eker, B. (2022) Polyurethane Foam Materials and Their Industrial Applications. *Polym Int*, 71, 1157-1163.
4. Stanzone, M., Oliviero, M., Cocca, M., et al. (2020) Tuning of Polyurethane Foam Mechanical and Thermal Properties Using Ball-Milled Cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 231, 115772.
5. Baferani, A.H., Keshavarz, R., Asadi, M., Ohadi, A.R. (2018) Effects of Silicone Surfactant on the Properties of Open-Cell Flexible Polyurethane Foams. *Adv. Polym. Technol.*, 37, 71-83.
6. Wang, Z., Wang, C., Gao, Y., Li, Z., Shang, Y., Li, H. (2023) Porous Thermal Insulation Polyurethane Foam Materials. *Polymers*, 15(18), 3818.
7. Šebenik, U., Krajnc, M. (2007) Influence of the Soft Segment Length and Content on the Synthesis and Properties of Isocyanate-Terminated Urethane Prepolymers. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 153, 527–535.
8. Smith, J.R., Johnson, E.M. (2018) Polyurethane Foam Preparation Techniques: A Comprehensive Review. *J. Mater. Sci.*, 45, 2897–2910.
9. Brown, A.B., White, C.D. (2020) Casting Method for Tailored Polyurethane Foams. *Polym. Eng. Sci.*, 60, 1800–1812.
10. Garcia, F.A., Lee, K.Y. (2019) Influence of Additives on Casting Polyurethane Foam Properties. *J. Cell. Plast.*, 56, 329–344.
11. Johnson, A.B., Smith, C.D. (2019) Spray-Foaming Techniques for Tailored Polyurethane Foams. *J. Appl. Polym. Sci.*, 136, 47512.
12. Garcia, E.F., Lee, K.Y. (2021) Advances in Polyurethane Spray Foaming: From Fundamentals to Applications. *Polym. Rev.*, 61, 284–301.
13. Smith, A.B., Johnson, C.D. (2020) Reaction Injection Moulding of Polyurethane Foam: Process Advancements. *Polym. Process.*, 25, 215–230.
14. Garcia, E.F., Lee, K.Y. (2022) Polyurethane Foam via RIM: Mechanical and Thermal Properties. *J. Cell. Plast.*, 58, 412–425.
15. Mikulich, O., Hulay, O., Furs, T., Shemet, V. (2024) Strength and Mechanical Characteristics of Modified Polyurethane Foams. *Procedia Structural Integrity*, 59(21), 460-465.

Дата надходження статті до видання: 27.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

Н. Медюх, А. Красіков^[0009-0001-0920-0143], О. Васільєв^[0000-0002-8358-7665]*Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України***ПОШУК МАТЕРІАЛІВ, ПОДІБНИХ ДО КАРБІДУ БОРУ НА ОСНОВІ ВІДКРИТИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ БАЗ ДАНИХ МАТЕРІАЛІВ**

У цьому дослідженні представлено підхід для виявлення матеріалів із властивостями, подібними до цільових сполук, з використанням відкритих обчислювальних баз даних матеріалів. Як тестовий матеріал використовується карбід бору (B_4C) із певними співвідношеннями бор-вуглець (0,78–0,91), для якого розроблено послідовність зі збору, обробки та аналізу даних. Для групування матеріалів за структурними, енергетичними та механічними властивостями застосовуються шість алгоритмів кластеризації, що представляють різні методологічні підходи, а також кілька методів селекції властивостей. Запропонована методологія успішно виявляє кластери з високою концентрацією цільових складів карбиду бору та розкриває інші борорвовмісні матеріали зі схожими властивостями. Цей підхід демонструє потенціал використання відкритих баз даних матеріалів для прискореного пошуку нових матеріалів і забезпечує підґрунтя, яке можна застосувати до різноманітних матеріальних систем поза межами карбиду бору.

Ключові слова: обчислювальний скринінг матеріалів, інформатика матеріалів, карбід бору

N. Mediukh, A. Krasikov, O. Vasiliev

DATA-DRIVEN DISCOVERY OF BORON CARBIDE-LIKE MATERIALS USING OPEN COMPUTATIONAL MATERIALS DATABASES

This study presents a data-driven approach for identifying materials with similar properties to target compounds using open computational materials databases. We use boron carbide (B_4C) with specific boron-to-carbon ratios (0.78-0.91) as our test case material and develop a robust pipeline for data collection, processing, and analysis. Six clustering algorithms representing different methodologies and several feature engineering techniques are employed to group materials based on structural, energetic, and mechanical properties. Our methodology successfully identifies clusters with high concentrations of target boron carbide compositions and reveals other boron-containing materials with similar properties. This approach demonstrates the potential of leveraging open materials databases for accelerated materials discovery and provides a framework applicable to various material systems beyond boron carbide.

Keywords: computational materials discovery, materials informatics, boron carbide

1. Introduction

In this context, computational materials discovery has advanced significantly through the development of high-throughput screening methodologies, primarily based on density functional theory (DFT) calculations. These efforts are substantially supported by the growth of open materials databases like the Materials Project [1] and NOMAD (Novel Materials Discovery) [2]. Such platforms facilitate property-based filtering and similarity searches across extensive datasets of calculated materials. However, a limitation of these approaches is their frequent reliance on pre-existing knowledge and defined chemical descriptors, which may restrict the identification of unanticipated compositions or structures with desired mechanical properties. To address these limitations, the field of materials informatics has emerged, with machine learning (ML) techniques becoming integral to materials research [3]. For example, supervised ML models have been successfully applied to predict various material properties [4]. Unsupervised learning methods, particularly clustering algorithms, are gaining attention for their capacity to identify inherent patterns and relationships within large materials datasets without requiring a priori labeling of material characteristics [5].

The application of clustering algorithms in materials discovery is predicated on their ability to perform unsupervised pattern recognition within complex, high-dimensional datasets. These methods can reveal intrinsic groupings of materials that share similarities in their features, which might not be discernible through conventional analysis [6]. The central hypothesis is that materials exhibiting analogous fundamental crystallographic, energetic, or mechanical properties will co-locate within a defined feature space. This offers a pathway to discover novel material analogues, such as those with mechanical properties similar to boron carbide, by identifying compounds that cluster with the target material, irrespective of exact stoichiometry or elemental composition. However, significant challenges in applying clustering to materials data include the appropriate selection and representation of material features (descriptors) relevant to mechanical behavior [5]. The choice of clustering algorithm and the subsequent validation of cluster quality both require careful consideration and often require domain-specific expertise. Furthermore, the development of quantitative evaluation metrics that are meaningful for materials science applications focusing on mechanical properties is essential for translating clustering results into actionable insights.

Boron carbide (B_4C) is a ceramic material characterized by a combination of desirable properties, including ultra-high hardness and low density [7]. These attributes underpin its utilization in demanding applications such as ballistic armor and abrasive cutting tools [8]. Nevertheless, challenges associated with the synthesis and processing of boron carbide, including high sintering temperatures and difficulties in achieving full densification, motivate the search for alternative materials with comparable or superior mechanical performance characteristics [9]. The discovery of such novel materials traditionally relies on experimental methodologies that are often resource-intensive and time-consuming. The combinatorial explosion of possible chemical compositions and structural configurations renders exhaustive experimental exploration impractical. Consequently, computational approaches are increasingly relevant for guiding and accelerating experimental efforts in materials discovery [10].

This work introduces a systematic, data-driven framework to identify novel materials with mechanical properties analogous to boron carbide. By applying unsupervised clustering to computational materials databases, we address the core challenges of feature engineering and algorithm selection to establish a robust pipeline for materials discovery. Our approach evaluates diverse feature sets and clustering models, using domain-specific metrics to ensure physical relevance. Ultimately, this methodology identifies specific candidates for experimental validation and provides a transferable architecture for targeting custom mechanical attributes across diverse material systems.

2. Materials and Methods

2.1 Data Collection and Database Construction

Materials data acquisition was evaluated through two primary approaches: the OPTIMADE [11] interface and direct database APIs. OPTIMADE is a standardized API specification that provides unified access to multiple materials databases, including AFLOW [12], Materials Project [1], and NOMAD [2]. However, practical implementation revealed significant limitations in the OPTIMADE approach. Individual database providers implement the OPTIMADE specification inconsistently, leading to incompatible data structures and response formats across providers. Additionally, the federated queries frequently encountered random API errors and timeout issues, making large-scale data harvesting unreliable. The theoretical advantage of accessing multiple databases through a single interface was undermined by these implementation inconsistencies and reliability issues.

The NOMAD database was selected as the primary data source due to its native API stability and comprehensive data coverage. Unlike the OPTIMADE interface, NOMAD's native API provides direct, stable access to its complete repository of computational materials data without the intermediary standardization layer that introduces inconsistencies. The NOMAD API demonstrated superior reliability for large-scale data harvesting operations and provided access to detailed computational metadata necessary for this analysis.

B_xZ_y , where Z - any element, materials data were systematically harvested from the NOMAD database using its native API (<https://nomad-lab.eu/prod/v1/api/v1/entries>). The data collection focused exclusively on Density Functional Theory (DFT) calculations to ensure computational consistency across the dataset. Filtering criteria included restricting the computational method to DFT calculations, requiring complete system geometry information, and requiring the availability of both total energy and stress tensor data. All available chemical systems were included without initial composition-based filtering to maintain dataset diversity.

The raw NOMAD data were stored in a MongoDB database to facilitate efficient querying and processing of large-scale materials data. This intermediate storage approach enabled robust error handling during data acquisition and flexible downstream analysis. The current analysis was executed on all 70k materials records available in the NOMAD database by the B^* search criteria.

2.2 Dataset Preparation and Feature Engineering

From each DFT calculation record, 13 quantitative features were systematically extracted to characterize the materials. Structural features included crystal space group number, unit cell volume per atom, lattice parameters (a, b, c lengths), and lattice angles (α , β , γ). Chemical features comprised boron atomic fraction (B_{ratio}), atomic number of the second most abundant element, and periodic table group of the second element. Physical features included the DFT total energy per atom and the von Mises equivalent stress calculated from the stress tensor components.

Statistical outliers were identified and removed using a 3-sigma criterion applied specifically to the energy and stress features ($energy_per_atom$, $equivalent_stress$). This targeted approach preserved natural diversity in structural parameters while removing potentially erroneous computational results. All features

were standardized using z-score normalization, and categorical variables (space groups) were handled with one-hot encoding when necessary.

Four distinct feature sets were designed to investigate the relative importance of different material properties: (1) all_features - complete 13-feature set including structural, chemical, and physical properties; (2) structural - crystal structure and lattice parameters only; (3) energy_stress - DFT energy and mechanical stress only; (4) structural_energy_stress - combined structural and energy/stress features excluding chemical composition.

Principal Component Analysis (PCA) was systematically applied to each feature set with varying numbers of components (2, 3, 4, 5, 6, and no PCA) to investigate the effect of dimensionality reduction on clustering performance.

2.3 Clustering Methodology

Six distinct clustering algorithms were implemented to capture different clustering paradigms: K-Means (centroid-based), Gaussian Mixture Model (probabilistic), Agglomerative Clustering (hierarchical with Ward linkage), Birch (hierarchical optimized for large datasets), DBSCAN (density-based with noise detection), and HDBSCAN (hierarchical density-based with varying density handling).

Each algorithm underwent systematic parameter optimization. K-Means, Agglomerative, Birch, and Gaussian Mixture Model were tested with cluster numbers from 2 to 20. DBSCAN explored epsilon values from 0.1 to 2.0 with minimum samples fixed at 5. HDBSCAN tested 36 parameter combinations varying minimum samples (5-30) and minimum cluster size (5-30).

The complete experimental matrix consisted of 4 feature sets \times 6 PCA configurations \times 6 algorithms with their parameter grids, resulting in 2,317 unique clustering experiments. All results were stored in MongoDB with complete parameter tracking for reproducibility and systematic analysis.

2.4 Discovery-Focused Evaluation Framework

The evaluation framework was designed as a general methodology for identifying clusters enriched with target materials, demonstrated here using boron carbide (BC) compounds as an example case. Target materials were defined as compounds containing both boron and carbon atoms with a boron-to-carbon atomic ratio within $0.78 \leq B/(B+C) \leq 0.91$, representing established BC stoichiometries. This approach can be adapted for any target material class by modifying the identification criteria.

A comprehensive scoring system was developed, combining multiple evaluation criteria:

- Silhouette Score: Traditional clustering quality metric ensuring geometric coherence, though weighted lower than domain-specific criteria.

- Cluster Count Score: Favors clustering solutions producing 10-25 total clusters, balancing granularity with interpretability. Solutions with fewer than 5 clusters receive minimal scores, while those exceeding 40 clusters are penalized for over-fragmentation.

- Target Concentration Score: Evaluates how effectively target compounds (BC materials) are concentrated within a few clusters. Optimal scores are achieved when 70%+ of target compounds reside in a single cluster, or 80%+ in two clusters. Solutions with target compounds dispersed across many clusters receive lower scores.

- Diversity Score: Assesses the composition diversity within target-rich clusters to ensure discovery potential. Clusters with 20-70% target compound ratios receive maximum scores, representing an optimal balance for identifying similar materials. Pure target clusters receive low scores because they offer limited discovery opportunities.

Each score range is from 0 to 1. Those scores are combined as a linear combination with the same weights to get the final score. The final score shows not only whether this clustering attempt is good enough according to the classical silhouette score, but also whether we can discover materials similar to boron carbide.

3. Results and Discussion

3.1 Data Collection Performance

Our data collection pipeline successfully harvested materials data from open computational material databases using Optimade API (via Python client library and via direct API calls) and Nomad API. Table 1 summarizes the data collection performance across different APIs and providers.

The NOMAD native API provided the most comprehensive dataset, but required significantly more time for complete harvesting. For targeted studies focusing on specific element combinations (e.g., boron carbide), filtered queries substantially reduced collection time while maintaining a high yield of relevant data.

Table 1

Data collection performance comparison				
Method	Provider	Structures Retrieved	Time (min)	Success Rate (%)
OPTIMADE Client	All	20,957	~10	95.3
OPTIMADE Client (filtered)	All	4,971	~5	94.7
OPTIMADE API	NOMAD	9,920	~15	99.6
OPTIMADE API	AFLOW	100,000	~120	98.2
NOMAD Native API	NOMAD	13,000,000	~1,800	99.9

3.2 Dataset Characteristics and Clustering Performance

Our systematic clustering analysis processed 29,378 materials records from the NOMAD database after outlier removal, representing a comprehensive survey of DFT-calculated crystalline materials. The dataset encompassed diverse chemical compositions, with particular focus on boron-containing compounds as our target case study. A total of 2,317 distinct clustering configurations were evaluated across six algorithms, four feature sets, and multiple PCA dimensionalities, demonstrating the robustness of our systematic approach.

3.2.1 Algorithm Performance Comparison

The comprehensive evaluation revealed significant performance differences across clustering algorithms and feature sets (Table 2). Birch clustering consistently achieved the highest performance with an average score of 0.552 across all configurations, followed by DBSCAN (0.511) and K-means (0.486). The superior performance of Birch can be attributed to its hierarchical approach and optimization for large datasets, making it particularly well-suited for materials discovery applications.

Table 2.

Algorithm Performance Summary			
Algorithm	Average Score	Best Configuration	Optimal Features
Birch	0.552	0.801	energy_mechanics
DBSCAN	0.511	0.797	energy_mechanics
K-means	0.486	0.691	energy_mechanics
Agglomerative	0.472	0.700	energy_mechanics
GMM	0.454	0.608	all_features
HDBSCAN	0.454	0.586	structural (PCA=3)

3.2.2 Feature Set Effectiveness

The energy_mechanics feature set demonstrated superior performance (average score 0.567) compared to other feature combinations, validating our hypothesis that energetic and mechanical properties are primary determinants of materials similarity. This finding suggests that materials with similar thermodynamic stability and mechanical response tend to exhibit analogous behaviors regardless of their exact chemical composition.

The structural feature set showed moderate performance (0.481), while the complete all_features set achieved comparable results (0.480). Interestingly, the structural_energy_mechanics combination (0.468) performed slightly lower than energy_mechanics alone, suggesting that the inclusion of structural parameters may introduce noise when energetic properties are already well-represented.

3.3 Target Material Identification

3.3.1 Optimal Clustering Configuration

The best-performing configuration employed Birch clustering with energy_mechanics features and no PCA dimensionality reduction, achieving a combined score of 0.801. This configuration successfully concentrated 65 boron carbide compounds with target B/(B+C) ratios (0.78-0.91) into 5 clusters out of 18 total clusters (Fig. 1).

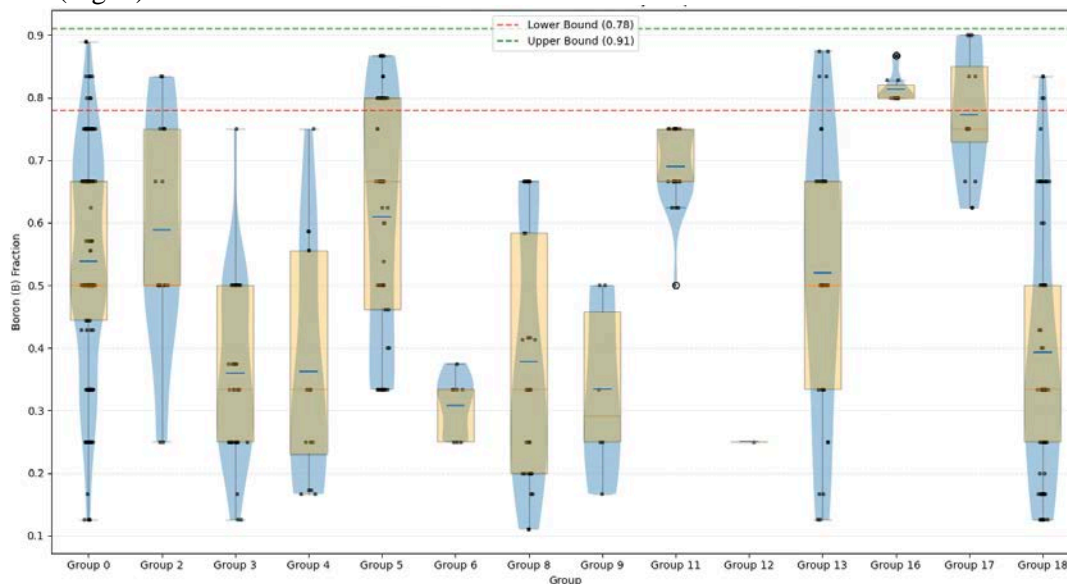


Fig. 1. Distribution of Boron content per cluster. Only clusters that have at least one boron carbide calculation are represented

3.3.2 Discovery Potential Analysis

The clustering analysis identified two distinct discovery clusters with contrasting compositional profiles, each offering unique insights for materials discovery.

Cluster 16 contained 148 compounds, dominated by alkali and alkaline-earth metal borides, exhibiting remarkable compositional consistency. The boron ratios ranged from 0.75 to 0.923, with most compounds falling in the 0.857-0.923 range—closely matching the target B_4C stoichiometry. The cluster was characterized by extensive representation of alkaline earth metal borides, including B-Ba (17 compounds), B-Sr (15 compounds), B-Ca (11 compounds), and B-Mg (11 compounds), alongside alkali metal borides such as B-Li (16 compounds), B-K (13 compounds), B-Na (10 compounds), and B-Cs (10 compounds). Rare earth borides were also present, notably B-Y (18 compounds) and B-La (13 compounds), while pure borocarbides (C-B, 14 compounds) exhibited boron ratios between 0.80 and 0.87. This cluster's chemical coherence suggests shared electronic structure and bonding characteristics relevant to B_4C like materials.

Cluster 17 comprised 81 compounds exhibiting greater chemical diversity, capturing materials with varied bonding character. Boron oxides (B-O, 25 compounds, boron ratio 0.89) dominated this cluster. Metal borides were represented by B-Na (15 compounds, boron ratio 0.87 - 0.94) and B-Mg (13 compounds, boron ratio 0.80 - 0.88). C-B borocarbides (16 compounds) spanned a wide compositional range from 0.625 to 0.90. The cluster also contained B-H borohydrides (12 compounds, boron ratio 0.29 - 0.38), representing alternative boron coordination environments distinct from the target B_4C structure.

The separation into electropositive metal borides and mixed-bonding structures provides actionable chemical insights for materials discovery. The first cluster suggests that electropositive metals may stabilize boron-rich structures through ionic bonding mechanisms similar to those in B_4C , making these compounds promising candidates for experimental synthesis. The second cluster, with its diverse bonding environments including covalent B-O and coordination-based B-H interactions, represents alternative pathways to achieve similar characteristics through fundamentally different chemical strategies. This focused clustering demonstrates that machine learning-driven materials discovery can simultaneously achieve high selectivity and chemical interpretability when appropriate feature engineering and scoring metrics are employed.

4. Conclusions

This study presents a systematic data-driven methodology for identifying materials with similar properties to target compounds using open computational material databases. Our comprehensive analysis

© Н. Медюх, А. Красіков, О. Васильєв

of 70k DFT-calculated materials from the NOMAD database, evaluated through 2,317 distinct clustering configurations, establishes several key contributions to computational materials discovery.

The systematic harvesting and processing of large-scale materials data from NOMAD demonstrates the feasibility of leveraging open databases for materials discovery. Our multi-tier feature engineering approach, encompassing structural, energetic, mechanical, and chemical descriptors, combined with rigorous outlier removal and standardization protocols, provides a robust foundation for unsupervised analysis. The comprehensive evaluation framework, testing six clustering algorithms across four feature sets with systematic PCA dimensionality reduction, ensures methodological rigor and reproducibility.

Our approach offers several distinct advantages over traditional materials discovery methods. Unsupervised clustering eliminates composition-based biases, enabling the discovery of non-obvious material analogues across diverse chemical spaces. The methodology scales naturally with database growth, becoming more powerful as computational repositories expand. Emphasis on energetic and mechanical descriptors captures fundamental principles of similarity that transcend elemental composition.

The framework's generalizability extends far beyond boron carbide systems. The methodology can be readily adapted to any target material class by modifying identification criteria and adjusting scoring weights according to desired properties. The convergence of energy-mechanics features across multiple algorithms suggests universal applicability of thermodynamic and mechanical property descriptors for materials similarity assessment.

References

1. A. Jain *et al.*, “Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation,” *APL Materials*, vol. 1, no. 1, p. 011002, Jul. 2013, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4812323>.
2. M. Scheidgen *et al.*, “NOMAD: A distributed web-based platform for managing materials science research data,” *The Journal of Open Source Software*, vol. 8, no. 90, pp. 5388–5388, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.21105/joss.05388>.
3. R. Batra, L. Song, and R. Ramprasad, “Emerging materials intelligence ecosystems propelled by machine learning,” *Nature Reviews Materials*, vol. 6, no. 8, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00255-y>.
4. A. S. Rosen *et al.*, “Machine learning the quantum-chemical properties of metal–organic frameworks for accelerated materials discovery,” *Matter*, vol. 4, no. 5, pp. 1578–1597, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.02.015>.
5. N. Bhat, N. Birbilis, and A. S. Barnard, “Unsupervised learning and pattern recognition in alloy design,” *Digital Discovery*, vol. 3, no. 12, pp. 2396–2416, 2024, doi: <https://doi.org/10.1039/d4dd00282b>.
6. J. Singh and D. Singh, “A comprehensive review of clustering techniques in artificial intelligence for knowledge discovery: Taxonomy, challenges, applications and future prospects,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 62, p. 102799, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102799>.
7. V. Domnich, S. Reynaud, R. A. Haber, and M. Chhowalla, “Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 94, no. 11, pp. 3605–3628, Oct. 2011, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x>.
8. S. G. Savio, K. Ramanjaneyulu, Vemuri Madhu, and T. Balakrishna Bhat, “An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 38, no. 7, pp. 535–541, Jul. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.01.006>.
9. A. B. Dresch, J. Venturini, S. Arcaro, O. R. K. Montedo, and C. P. Bergmann, “Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review,” *Ceramics International*, vol. 47, no. 7, pp. 8743–8761, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.095>.
10. M. Cheng *et al.*, “Artificial intelligence-driven approaches for materials design and discovery,” *Nature Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 174–190, Jan. 2026, doi: <https://doi.org/10.1038/s41563-025-02403-7>.
11. M. L. Evans *et al.*, “Developments and applications of the OPTIMADE API for materials discovery, design, and data exchange,” *Digital discovery*, vol. 3, no. 8, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1039/d4dd00039k>.
12. M. J. Mehl *et al.*, “The AFLOW Library of Crystallographic Prototypes,” *arXiv.org*, 2016. <https://arxiv.org/abs/1607.02532> (accessed Apr. 01, 2026).

Дата надходження статті до видання: 28.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

© Н. Медюх, А. Красіков, О. Васильєв

М.П. Ярошевич^[0000-0002-2436-5608], В.С. Пуць^[0000-0003-3164-6173], Т.С. Ярошевич^[0000-0001-8003-0514],
В.Л. Мартинюк^[0000-0002-6914-2336]

Луцький національний технічний університет

ДИНАМІЧНА СИНХРОНІЗАЦІЯ ІНЕРЦІЙНИХ ВІБРОЗБУДНИКІВ БІГАРМОНІЧНОГО ВІБРОПРИВОДУ

Розглядається можливість отримання стійких бігармонічних коливань вібромашини з кінематично незв'язаними інерційними віброзбудниками. Досліджується динамічна синхронізація двох пар інерційних віброзбудників з кратними частотами обертання. Задача розв'язується за допомогою інтегрального критерію стійкості (екстремальної властивості) синхронних рухів. Встановлені зсуви фаз у можливих синхронних рухах віброзбудників, умови існування та стійкості синхронних рухів. Отримано формули для вібраційних моментів, які забезпечують самосинхронізацію віброзбудників. Теоретичні результати підтверджуються чисельним моделюванням.

Ключові слова: вібромашина, бігармонічні коливання, дебалансний віброзбудник, самосинхронізація, інтегральний критерій.

M. Yaroshevich, V. Puts, T. Yaroshevych, V. Martyniuk

DYNAMIC SYNCHRONIZATION OF INERTIAL VIBRATION EXCITERS BIHARMONY VIBRATION DRIVE

The possibility of obtaining stable biharmonic oscillations of a vibration machine with kinematically uncoupled inertial vibration exciters is considered. The dynamic synchronization of two pairs of inertial vibration exciters with multiple rotation frequencies is investigated. The problem is solved using the integral stability criterion (extreme property) of synchronous movements. Phase shifts in possible synchronous movements of vibration exciters, conditions for the existence and stability of synchronous movements are established. Formulas for vibration moments that ensure self-synchronization of vibration exciters are obtained. Theoretical results are confirmed by numerical modeling.

Keywords: vibration machine, biharmonic oscillation, unbalanced vibrator, self-synchronization, integral criterion.

Постановка проблеми. Вібромашини з інерційними збудниками, що самосинхронізуються, серійно випускаються та успішно працюють як на підприємствах нашої країни, так і багатьох країн світу [1-3]. Основними перевагами використання явища самосинхронізації у приводі вібромашин є: усунення високонавантажених кінематичних передач між віброзбудниками; розосередження збуджуючої сили вздовж робочого органу (для забезпечення збільшення жорсткості робочого органу); зменшене навантаження на підшипники віброзбудників; можливість прикладання збуджуючої сили у центрі інерції системи. Разом з тим, можливості вдосконалення вібромашин на основі явища самосинхронізації ще далеко не вичерпані.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. На сьогодні явище динамічної синхронізації інерційних віброзбудників досліджено достатньо добре [1, 2]. В [4] розглядаються дві нові можливості удосконалення вібромашин, які містять в конструкції віброзбудники, що самосинхронізуються, а саме: почерговий пуск віброзбудників та ефект вібраційного підтримання обертання. Переваги використання почергового пуску інерційних віброзбудників обґрунтовується також в статті [5]. Можливості використання ефекту самосинхронізації для створення вібромашин із законом коливань робочого органу, який може змінюватися при роботі, демонструється в [6]. В працях [7, 8] звертається увага на можливість розв'язування практичних задач самосинхронізації за методикою дослідження ефекту вібраційного захвату обертання незрівноваженого ротора. Проте, в існуючих дослідженнях розглядається, зазвичай, самосинхронізація віброзбудників з однаковими частотами обертання.

Випадкам самосинхронізації віброзбудників з кратними частотами обертання присвячено істотно менше досліджень [1, 9-12]. В монографії [1] вказується на значно більшу складність розв'язування даних задач, а також на проблеми практичного використання ефекту кратної самосинхронізації. У статті [10] обґрунтовується можливість використання інтегрального критерію стійкості синхронних рухів для розв'язування задач кратної самосинхронізації. Частковій самосинхронізації інерційних віброзбудників бігармонічного вібропривода присвячені статті [11, 12].

Мета досліджень. Продемонструвати можливість отримання горизонтальних бігармонічних коливань робочого органу вібромашини з інерційними віброзбудниками, які не з'єднані кінематичними передачами.

Методика дослідження. Для вирішення поставлених задач використано методи теоретичної та вібраційної механіки, а також інтегральний критерій стійкості синхронних рухів. Чисельне моделювання проводилося з використанням математичного пакету Maple.

Викладення основного матеріалу. *Опис динамічної системи та диференціальні рівняння руху.* На віброуючому робочому органі вібромашини (несучому твердому тілі), жорстко закріплені дві пари інерційних віброзбудників (рис. 1). Робочий орган встановлено на нерухомій основі за допомогою гвинтових циліндричних пружин. В загальному випадку робочий орган може здійснювати плоскі коливання. Усі віброзбудники приводяться в обертання від незалежних асинхронних електродвигунів. Причому, віброзбудники у парах обертаються в протилежних напрямках; пари віброзбудників приводяться в обертання від електродвигунів з кратними синхронними частотами. Осі віброзбудників перпендикулярні до площини коливань робочого органу.

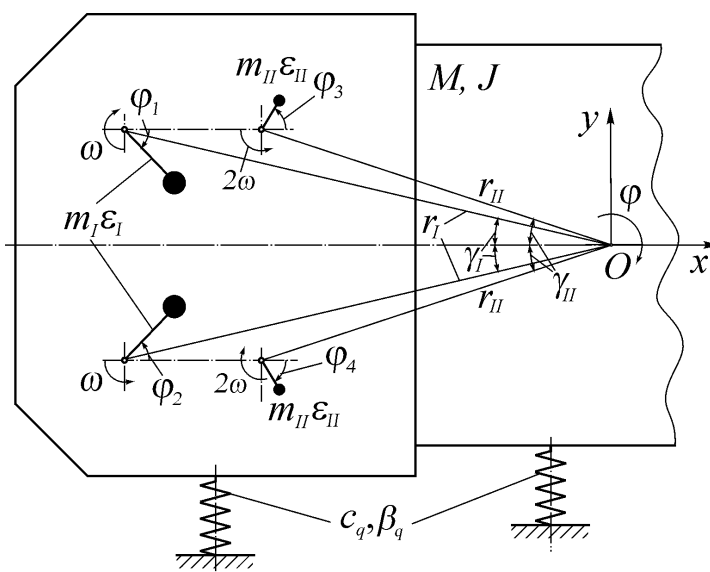


Рис. 1. Динамічна схема бігармонічного віброприводу

Рівняння руху такої динамічної системи можна подати у вигляді [1]:

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} + \beta_x \dot{x} + c_x x &= \sum_{s=1}^4 m_s \varepsilon_s \dot{\varphi}_s^2 \cos \varphi_s, & M\ddot{y} + \beta_y \dot{y} + c_y y &= -\sum_{s=1}^4 m_s \varepsilon_s \dot{\varphi}_s^2 \sin \varphi_s, \\
 J\ddot{\varphi} + \beta_\varphi \dot{\varphi} + c_\varphi \varphi &= \sum_{s=1}^4 m_s \varepsilon_s r_s \dot{\varphi}_s^2 \sin(\varphi_s + \delta_s), & I_s \ddot{\varphi}_s &= L_s(\dot{\varphi}) - R_s(\dot{\varphi}) + \Psi_s,
 \end{aligned} \quad (1)$$

де M , J , $q_j = x, y, \varphi$ – маса, момент інерції та узагальнені координати пружно підвішеного робочого органу; φ_s , $m_s \varepsilon_s$ – кути повороту та статичні моменти віброзбудників; β_q , c_q – коефіцієнти в'язкого опору та жорсткості пружин підвіски робочого органу; r_i – віддаль від центру ваги O до осі i -го віброзбудника; I_s – зведені моменти інерції віброзбудників; $L_i(\dot{\varphi}_i)$ – обертовий момент на валу електродвигуна; $R_i(\dot{\varphi}_i)$ – зведений момент сил опору обертання (обумовлений переважно опором у підшипниках); g – прискорення вільного падіння.

Аналітичні дослідження самосинхронізації бігармонічних віброзбудників. У розглядуваних практичних випадках віброзбудники та електродвигуни пар номінально однакові: $m_1 \varepsilon_1 = m_2 \varepsilon_2 = m \varepsilon_{1,2} = m_I \varepsilon_I$; $m \varepsilon_{3,4} = m_{II} \varepsilon_{II}$; $r_{1,2} = r_I$; $r_{3,4} = r_{II}$; $I_{1,2} = I_I$; $I_{3,4} = I_{II}$. У разі коли, консервативні сили по коливних координатах не враховуються, для розв'язування прикладних задач динамічної синхронізації інерційних віброзбудників може бути використаний інтегральний критерій стійкості синхронних рухів [1, 4]. Згідно даного критерію, стійкі синхронні рухи віброзбудників відповідають точкам грубих мінімумів, деякої функції D різниці фаз обертання збудників. Дану функцію називають потенціальною. Оскільки у технічних задачах парціальні кутові

швидкості віброзбудників вважаються однаковими (достатньо близькими), то роль потенціальної функції D буде відігравати середнє значенню функції Лагранжа Λ робочого органу [1]. Внаслідок припущення про «м'якість» пружних опор робочого органу ($\dot{\varphi}_i \gg p_q$, де p_q – власні частоти коливань робочого органу), функція Лагранжа Λ дорівнює середньому значенню його кінетичної енергії:

$$D = \frac{1}{2} \langle M(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + J\dot{\varphi}^2 \rangle. \quad (2)$$

Зазначимо, що кутові дужки $\langle \dots \rangle$ вказують на усереднення виразів за швидким часом $\tau = \omega t$.

Згідно методики дослідження, систему рівнянь коливань робочого органу (1) достатньо розв'язувати за припущення про рівномірне обертання віброзбудників: $\varphi_i = \varphi_i^0 = \sigma_i(\omega_i t + \alpha_i)$, де $\sigma_i = \pm 1$ в залежності від напрямку обертання віброзбудника; $\omega_{1,2} = \omega$, $\omega_{3,4} = 2\omega$; ω – частота кратно-синхронного обертання. У цьому разі рівняння руху робочого органу перетворюються на звичайні лінійні диференціальні рівняння малих вимушених коливань. З урахуванням розв'язків рівнянь (1), після усереднення виразу (2) отримуємо формулу для потенціальної функції:

$$D = -V_I \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - V_{II} \cos(\alpha_3 - \alpha_4), \quad (3)$$

де $V_I = \frac{(m_I \varepsilon_I r_I \omega)^2}{2J}$, $V_{II} = \frac{2(m_{II} \varepsilon_{II} r_{II} \omega)^2}{J}$ – максимальні значення (модулі) вібраційних моментів.

Як відомо, вібраційні моменти характеризують усереднений вплив вібрації на обертання віброзбудників; саме вібраційні моменти призводять (за виконання певних умов) до самосинхронізації віброзбудників.

Вираз для потенціальної функції (3) містить лише різниці фаз віброзбудників з однаковими частотами. Різниці фаз збудників з кратними частотами відсутні. Звідси слідує, що динамічний зв'язок між парами віброзбудників відсутній. Звичайно, таке заключення справедливе лише у розглядуваному наближенні. Отже, у першому наближенні (реалізованого на практиці) задача про кратну самосинхронізацію розпадається на дві однакові задачі. Кожна з них окремо є відомою задачею про самосинхронізацію двох збудників з однаковими частотами обертання в протилежних напрямках, які встановлені на робочому органі з плоскими коливаннями. Тоді аналогічно [1], нескладно встановити, що протифазні режими обертання віброзбудників у парах будуть стійкими за будь-яких поєднань параметрів; необхідним є лише виконання умов $r_I \neq 0$, $r_{II} \neq 0$. Умови існування синфазних режимів руху можна подати у вигляді [1]:

$$k_{1-2} |\omega_1 - \omega_2| / V_{I\varphi} < 1, \quad k_{3-4} |\omega_3 - \omega_4| / V_{II\varphi} < 1,$$

де k_{1-2}, k_{3-4} – коефіцієнти демпфування. Для зарезонансних вібромашин з однаковими (близькими) парціальними частотами дані умови обов'язково виконуються. Тобто, на практиці обов'язково мають встановитися два усталені режими протифазного обертання віброзбудників у парах. Відповідно, робочий орган вібромашини буде коливатися за бігармонічним законом.

Результати комп'ютерного моделювання. Моделювання зводилося до чисельного інтегрування системи (1) та рівнянь динамічної моделі асинхронного електродвигуна [8]. Параметри системи: $M = 108 \text{ kg}$; $J = 2,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $c_q = 3,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}$; $\beta_q = 500 \text{ kg/s}$; $m_I = 3,2 \text{ kg}$; $\varepsilon_I = 0,02 \text{ m}$; $I_1 = 0,008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $I_2 = 0,005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $r_I = 0,76 \text{ m}$; $r_{II} = 0,51 \text{ m}$; $\gamma_I = 0,13 \text{ rad}$; $\gamma_{II} = 0,11 \text{ rad}$; електродвигуни $P_N = 0,18 \text{ kW}$, $\omega_s = 157 \text{ rad/s}$. Зазначимо, що основні віброзбудники приводяться в обертання за допомогою клинопасової передачі з передатним числом 2:1.

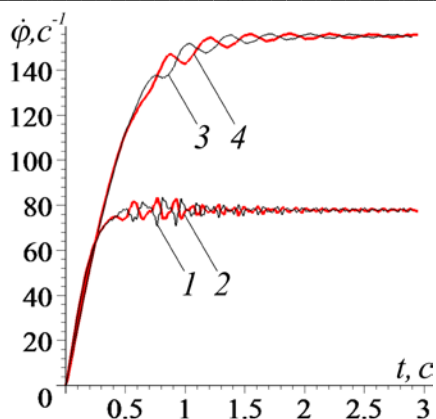


Рис. 2. Зміни в часі частоти віброзбудників:
1) $\dot{\varphi}_1$; 2) $-\dot{\varphi}_2$; 3) $-\dot{\varphi}_3$; 4) $\dot{\varphi}_4$

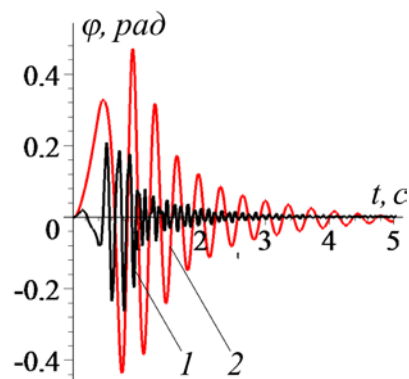


Рис. 3. Зміни в часі різниці фаз між віброзбудниками у парах: 1 - φ_{12} ; 2 - φ_{34}

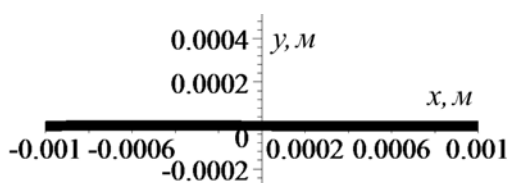


Рис. 4. Траєкторія руху центра мас робочого органу

Результати чисельного моделювання вказують на можливість усталених бігармонічних коливань несучого тіла вібромашини з дебалансними віброзбудниками, які не зв'язані кінематичними передачами. Про це свідчать графіки зміни в часі частоти обертання віброзбудників та різниці фаз між збудниками у парах, а також графіки траєкторії коливань центра мас робочого органу. Як слідує з рис. 2, в усталеному режимі руху віброзбудники у парах обертаються у протифазі з синхронними частотами: $\dot{\varphi}_1 \approx |\dot{\varphi}_2| = \omega_1 \approx 78,2 \text{ s}^{-1}$, $|\dot{\varphi}_3| \approx \dot{\varphi}_4 = \omega_{II} = 155,3 \text{ s}^{-1}$ (рис. 3); відношення синхронних частот віброзбудників різних пар близьке до кратного. Згідно рис. 4, траєкторія робочого органу в усталеному режимі – поступальні коливання паралельно осі Ox (рис. 3). Приведена різниця фаз між віброзбудниками з кратними частотами є змінною.

Висновки.

Встановлено можливість отримання поступальних бігармонічних коливань робочого органу вібромашини з двома парами дебалансних віброзбудників, які не зв'язані кінематичними передачами.

Показано, що запропонована динамічна схема допускає два стабільні усталені режими протифазного обертання віброзбудників кожної пари; обертання пар збудників відбувається майже з кратними частотами.

Список використаних джерел:

1. Blekhman I.I. Vibrational mechanics – Nonlinear dynamic effects, General approach, Applications. - Singapore at al.: World Scientific, 2000.
2. Blekhman I.I., Blekhman L.I., Dresig H. et al. Selected Topics in Vibrational Mechanics. - Singapore at al.: World Scientific, 2004, 409 p.
3. Ярошевич М.П., Ярошевич Т.С. Динаміка розбігу вібраційних машин з дебалансним приводом: монографія / Луцьк: ЛНТУ, 2010. – 220 с.
4. Blekhman I.I., Vasil'kov.V.B. On Some Opportunities for Improving Vibration Machines with Self-Synchronization Inert Vibration Exciters. Journal of Machinery manufacture and reliability, 2013, Vol.42, №3, P. 192-195.

5. Ярошевич М.П., Силивонюк А.В. Про деякі особливості динаміки розбігу вібраційних машин зі збудниками, що само синхронізуються.- Науковий вісник національного гірничого університету, 2013, № 4, С. 70-75.
6. Blekhman, I.I., Semenov, Y.A. On the possibility of designing adaptive vibration machines with self-synchronizing exciters. *Mechanisms and Machine Science*, 80, 231-236 (2020)
7. Yaroshevich N., Grabovets V. et al. On the effect of vibrational capture of rotation of an unbalanced rotor. *Mathematical Models in Engineering*, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 81-93, <https://doi.org/10.21595/mme.2023.23273>.
8. Yaroshevich N., Gursky V. et al. (2022) On the dynamics of vibrational capture of rotation of an unbalanced rotor. *Vibroengineering Procedia*, Vol. 42: 1-6, <https://doi.org/10.21595/vp.2022.22413>.
9. Ragulskis K. *Mechanisms on a vibrating base*. Kaunas: Publishing House of the Institute of Energy and Electrical Engineering. AS of the Lithuanian SSR, 1993, 232 p.
10. Blekhman I.I. Extension of the domain of applicability of the integral stability criterion (extreme properties) in synchronization problems. *Journal of Applied mathematics and mechanics*. Vol.68, No 6, pp.839-846, Elsevier Ltd. 2004.
11. N. Yaroshevich, V. Puts, T. Yaroshevych, and V. Martyniuk, "Self-synchronisation of vibration exciters of a biharmonic vibration drive," *Vibroengineering Procedia*, Vol. 55, pp. 27–32, Sep. 2024, <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24416>
12. Yaroshevich N., Puts V. T.Yaroshevych, and V. Martyniuk. (2025) Study of self-synchronization of unbalanced vibration exciters of a biharmonic vibration drive. *Vibroengineering procedia*, Vol. 59: 96-102, doi: [10.21595/vp.2025.25204](https://doi.org/10.21595/vp.2025.25204)
13. Чабан В. Й. Математичне моделювання електромеханічних процесів. Львів: вид-во держ. ун-ту «Львівська політехніка», 1997. 342 с.

Дата надходження статті до видання: 28.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

В.П. Кашицький^[0000-0003-2346-912X], О.Л. Садова^[0000-0002-6152-5447], А.В. Чернов, Ю.І. Крась*Луцький національний технічний університет***ФОРМУВАННЯ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ РЕЦИКЛОВАНИХ
НАПОВНЮВАЧІВ СИНТЕТИЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ**

Представлено методику переробки скловолокнистих полімеркомполімерних матеріалів методом механічного подрібнення з наступною класифікацією частинок та формуванням епоксикомполімерних зразків. Визначено підвищення фізико-механічних характеристик епоксикомполімерних матеріалів на основі вторинної сировини, що структуровані за кінцевої температури 170°C. Встановлено зниження міцності на стискання та вмісту гель-фракції епоксикомполімерного матеріалу в результаті введення до складу композиції наповнювача в кількості більше 200 мас.ч., однак використання наповнювача в кількості 600 мас.ч. забезпечує зростання ударної в'язкості епоксикомполімерів. Використання частинок вторинної сировини меншого розміру покращує технологічність композиції та міцність на стиснення епоксикомполімерів.

Ключові слова: епоксидне в'язуче, фракція, термічна обробка, міцність на стиснення, гель-фракція, ударна в'язкість, характер руйнування.

V. Kashytskyi, O. Sadova, A. Chernov, Yu. Kras

**FORMATION OF EPOXY COMPOSITES BASED ON RECYCLED FILLERS OF
SYNTHETIC ORIGIN**

A method of processing glass-fiber polymer composite materials by mechanical grinding with subsequent classification of particles and formation of epoxy composite samples is presented. An increase in the physical and mechanical characteristics of epoxy composite materials based on secondary raw materials, structured at a final temperature of 170°C, is determined. A decrease in the compressive strength and gel fraction content of the epoxy composite material as a result of introducing a filler into the composition in an amount of more than 200 wt. parts is established. However, the use of a filler in an amount of 600 wt. parts provides an increase in the impact strength of epoxy composites. The using of smaller particles of secondary raw materials improves processability of the composition and increases the compressive strength of epoxy composites.

Key words: epoxy binder, fraction, heat treatment, compressive strength, gel fraction, impact strength, fracture behavior.

Formulation of the problem. Over the past few decades, polymer composites have replaced many metal or ceramic materials in various applications due to their ease of processing, corrosion resistance, light weight and cost-effectiveness. Such materials provide an optimal ratio between weight and mechanical properties, which is practically unattainable for many traditional materials, so their introduction into the aviation, automotive industries and the construction of large structures is quite relevant. The demand for carbon and glass fibers is constantly increasing, since such fibers are almost entirely used as reinforcement in plastic matrix composites (mainly epoxy type). The consumption of a huge amount of synthetic polymer materials and fibers in composites creates a serious problem for recycling and waste management. Most high-performance polymer composites are based on thermosetting polymer materials, which are not recyclable, since their internal three-dimensional structure with covalent bonds creates obstacles to the decomposition and recycling of used products. Therefore, there is a need to conduct research that will determine the technology for processing composites based on thermosetting materials, which is of great importance for resource conservation and environmental protection.

Analysis of recent research and publications. Glass fiber reinforced polymer composites (GFRP) are polymer composites that are widely used in electronics, electrical engineering, construction, automotive, shipbuilding and aviation industries due to their high specific strength and corrosion resistance [1]. The requirements of sustainable development and the principles of circular economy require the development of technologies for processing polymer composites based on thermosetting polymers, which usually contain a significant amount of inorganic filler. Forming processing of polymer composite material is very difficult because of the heterogeneous nature of the polymer composite material. Therefore, thermosetting polymers do not melt or dissolve, and their processing is difficult [2]. In most cases, glass fiber polymers end up in solid waste landfills [3] or incinerators, which leads to a negative impact on the environment.

According to current research, scientists recommend several alternative technologies for GFRP recovery, including mechanical, chemical and thermal methods [4–6]. Mechanical processing involves mechanical reduction of the size of composite waste by grinding [7]. The starting material is reduced by impact and shear to a size that allows the fragments to pass through a specified size of the screen holes of the shredder. Typically, recyclates are in the form of flakes, fiber-rich and resin-rich fractions [8].

© В.П. Кашицький, О.Л. Садова, А.В. Чернов, Ю.І. Крась

Chemical processing can include solvolysis, hydrolysis and acid cleavage using solvents, water, glycols and acids. In this case, the process ensures the dissolution of the polymer matrix to separate it from the filler. The thermal processing process involves high temperatures and the use of complex equipment, which, together with chemical treatment, limits the widespread use of such processing methods.

Mechanical and physical methods are most often used due to the simplicity of the equipment design. However, the disadvantage of the mechanical method is that the fillers cannot be obtained in their original form, since during grinding the fillers lose their strength and technological properties. In addition, it is difficult to remove the structured polymer from the filler surface.

In [9], positive results of mechanical processing of fiberglass waste were noted, since primary oil-based resources are saved. Mechanical processing remains an effective option for fiberglass processing [10], especially from an environmental point of view, since the use of a closed loop and secondary raw materials allows for additional environmental benefits. In addition, it was found that the processes of recovering products from glass fiber polymer composites (GFRP) waste require significantly less energy (0.17–1.93 MJ/kg) compared to the production of primary fiberglass (13–54 MJ/kg) [11]. Recycled fiberglass fragments are usually in the form of short fibers or powder, unlike primary, long fibers, which affects the technology for forming products from recycled materials.

Setting tasks. The aim of the work is to study the influence of the fractional composition of fragments from the processing of glass-fiber polymer composites on the mechanical characteristics of recycled epoxy composites formed at different heat treatment temperatures.

Presentation of the main material. The secondary raw material is fragments of electronic boards based on fiberglass, which were dried at a temperature of 110° C for 2 hours. Next, additional grinding of the fragments was carried out, after which the powder was sieved using sieves with a hole size of 0.7 mm and 0.5 mm. The resulting powder was mixed with epoxy binder to a homogeneous mass and placed in the mold matrix. The composition was compressed using a hydraulic press and left for structuring for 24 hours at room temperature. Heat treatment of the samples was carried out in a stepwise mode: 1 hour at a temperature of 50° C, 1 hour at a temperature of 100° C, 5 hours at a temperature of 170° C. The highest compressive strength is achieved by epoxy composite materials with a content of finely dispersed filler (fraction less than 0.5 mm) of 150 wt. parts per 100 wt. parts. epoxy binder under the condition of heat treatment for 3 h at a final temperature of 150° C (Fig. 1). Compressive strength of biocomposites decrease by 6–8% with an increase in the final temperature of heat treatment 170° C, which is associated with the appearance of residual stresses due to excessive compression of the composition during the molding process under the influence of static load, since fine-dispersed fillers have a high ability to compact compared to fillers of a larger fraction.

The compressive strength of biocomposites decrease to 280 MPa after heat treatment at a final temperature of 150° C in the case of using a fine-dispersed filler in an amount of 200 wt. parts. This is due to the increased content of the filler, which has high surface energy and requires an optimal amount in the ratio of system components. Increasing the final heat treatment temperature to 170°C leads to an increase of 17–18% in the compressive strength compared to 150°C, since a higher heat treatment temperature provides a higher degree of structuring due to the formation of additional chemical bonds between the components of the epoxy polymer system.

Biocomposite materials contained with 600 wt. parts of the filler have less compressive strength by 68–70% after heat treatment at a temperature of 150°C compared to epoxy composites containing the filler in an amount of 150 wt. parts. This is due to the excess content of filler, which is not wetted by the epoxy binder. With an increase in heat treatment temperatures to 170°C, epoxy composites obtain a high strength value (292 MPa), which indicates the dominant effect of heat treatment on the structuring processes, since the mobility of the segments of the epoxy matrix macromolecules increases.

The ultimate strength of epoxy composite materials containing larger particles (more than 0.5 mm) is 356 MPa (Fig. 2), which is almost the same as the strength of epoxy composites (360 MPa) containing fine particles less than 0.5 mm in size. With an increase in the heat treatment temperature to 170° C, there is a slight increase in the compressive strength to 363 MPa, which is due to the ability of the epoxy matrix macromolecules to perform oscillatory movements in the structure, which is characterized by a less dense arrangement of filler particles compared to the compact arrangement of particles in epoxy composites containing a fine fraction (less than 0.5 mm)

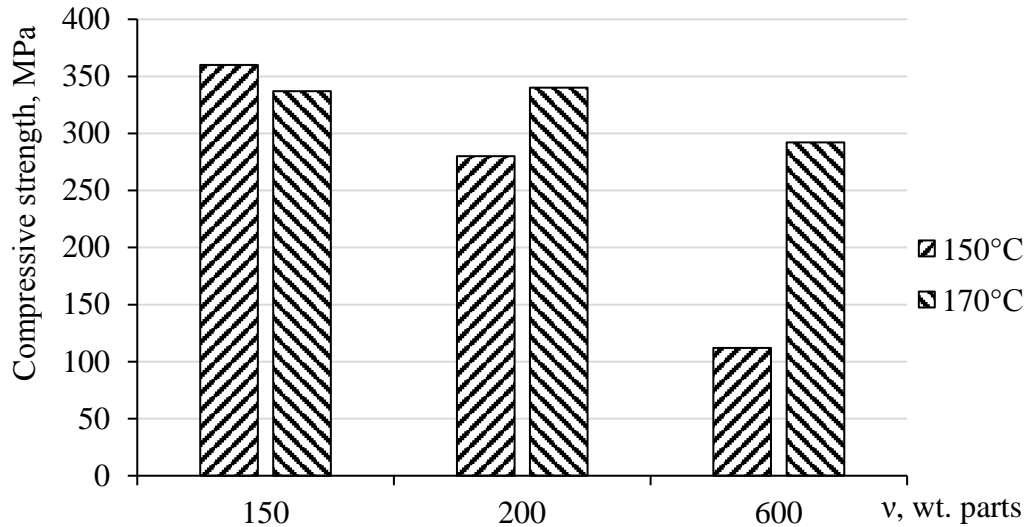


Fig. 1. The influence of the content of powder particles of secondary raw material of a fraction less than 0.5 mm on the compressive strength of epoxy composites

Increasing the filler content to 200 wt. parts leads to a decrease in the compressive strength, since larger particles are more chaotic arrangement and they are difficult to compactly arrange in the volume of the epoxy polymer matrix. Increasing the temperature to 170° C provides a slight increase in compressive strength due to the possibility of forming a larger number of chemical bonds.

Compressive strength of bio-composites decrease to 95 MPa in the case of containing of a filler in an amount of 600 wt. parts, which is due to insufficient thermal effect at a temperature of 150° C of heat treatment. Increasing the temperature to 170° C provides a compressive strength limit in the range of 280–290 MPa, since additional structuring of the epoxy composite system occurs.

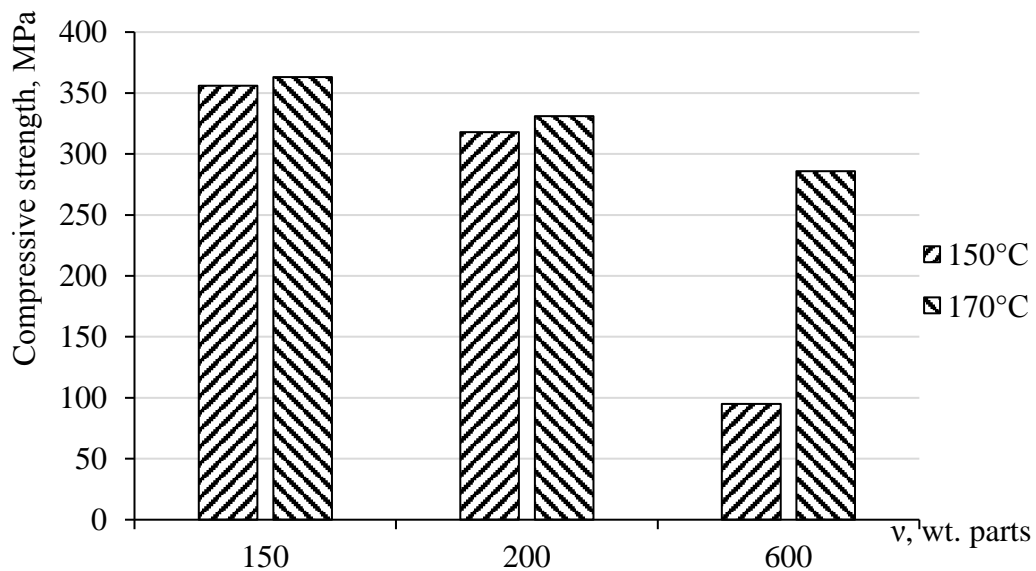


Fig. 2. The influence of the content of powder particles of secondary raw of a fraction larger than 0.5 mm on the compressive strength of epoxy composites

The gel fraction content in the epoxy composite material with a filler content of 150 wt. parts, which contains particles of a fraction with a size to 0.5 mm, is 88% in the case of sample processing at a final temperature of 150° C (Fig. 3). With an increase in the heat treatment temperature to 170° C, the degree of structuring increases to 92%, which is associated with an increase in the rate of chemical reaction and the formation of a larger number of chemical bonds.

Gel fraction content of biocomposites decreases slightly with an increase in the filler content to 200 wt. parts, since the density of the epoxy composite material decreases due to the introduction of larger particles. The structuring of the system can be improved by using the temperature of heat treatment of 170° C. This is possible due to increased mobility of the segments of the epoxy matrix macromolecules.

The content of the gel fraction is the lowest in the case of forming a material with a filler content of 600 wt. parts. This is due to the presence in the system of a large number of particles that are poorly wetted by the binder.

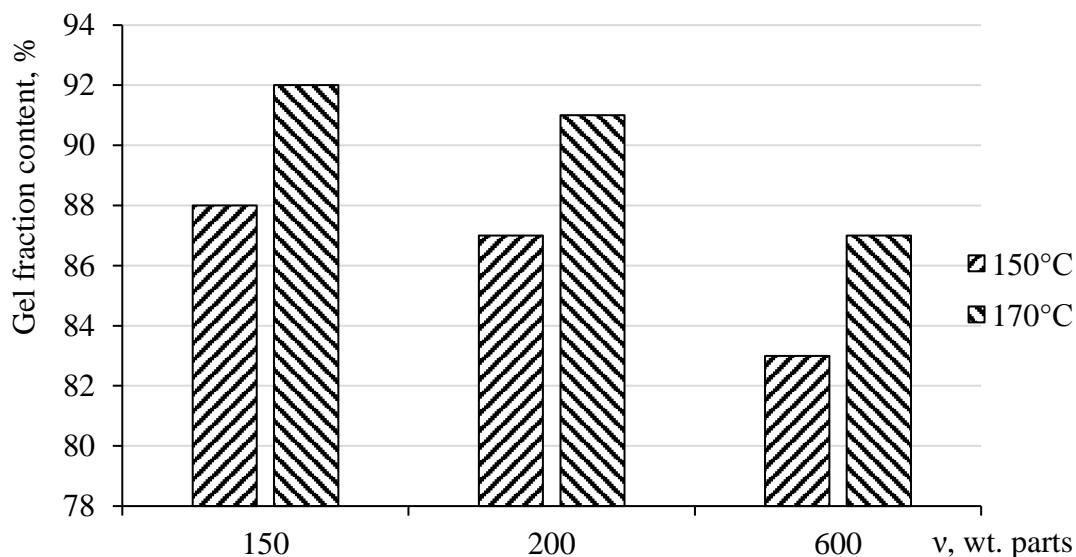


Fig. 3. The influence of the content of powder particles of secondary raw material of a fraction less than 0.5 mm on the content of the gel fraction of epoxy composites

The impact strength of epoxy composites with a filler content of 150 wt. parts, which are structured at a final heat treatment temperature of 150° C, is 3.2 kJ/m² (Fig. 4). With an increase in the heat treatment temperature to 170° C, the investigated characteristic increases to 4.5 MPa, which is associated with an increase in the material's resistance to dynamic loads due to better structuring of the epoxy polymer matrix.

Increasing the filler content to 200 wt. parts leads to a decrease in the impact strength of the material in the case of a heat treatment temperature of 150° C, which is explained by the insufficient thermal effect on the formation of a highly filled system. With an increase in temperature to 170° C, the impact strength increases to 4.8 kJ/m² due to the possibility of forming additional chemical bonds.

The temperature of 150°C is insufficient for the formation of epoxy composites with a filler content of 600 wt. parts, since the ability of the binder to wet the surface of the filler particles is reduced, however, after processing at a temperature of 170°C, the impact strength increases to its maximum value of 5.7 kJ/m². The increase in this characteristic occurs by 20–22% compared to the impact strength of epoxy composites containing 150 wt. parts of the filler. Such an increase in impact strength is due to the presence of a significant number of obstacles to crack propagation under the influence of dynamic loading in a rigid epoxy polymer matrix. Particles larger than 0.5 mm in size form obstacles in the epoxy polymer matrix that are able to dissipate kinetic energy better than smaller filler particles.

The structure of epoxy composites depends on the size of the filler particles based on secondary raw materials and its content in the epoxy polymer matrix. A dense structure of epoxy composites is formed in the case of using a filler in an amount of 150 wt. parts, since the particles are fully wetted by the epoxy polymer binder (Fig. 5, a). With an increase in the filler content to 200 wt. parts, small pores are present on the surface of the epoxy composite sample (Fig. 3.5, b). This indicates about an insufficient binder content in the system. Craters and pores are present on the surface of the epoxy composite material, which contains 600 wt. parts of filler (Fig. 3.5, c), which indicates a low degree of compaction of the epoxy composite material due to poor wettability.

Under the influence of static loading, the epoxy composite samples are destroyed with the formation of a main crack, which indicates the formation of a rigid structure of the epoxy polymer matrix.

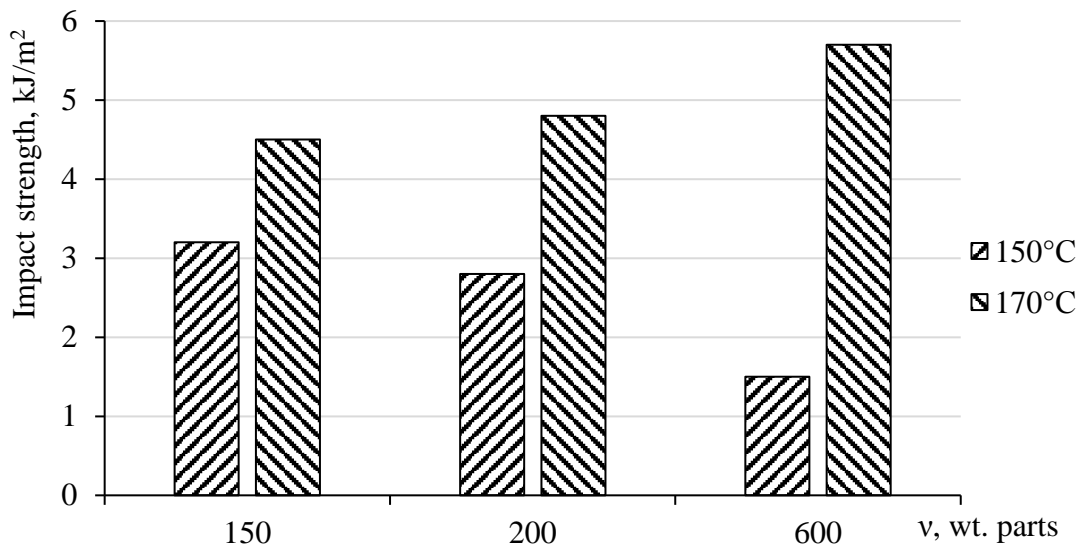


Fig. 4. The influence of the content of powder particles of secondary raw material of a fraction less than 0.5 mm on the impact strength of epoxy composites

The main crack in the epoxy composite sample with a particle fraction of less than 0.5 mm and a filler content of 150 wt. parts is located at an angle of 75° (Fig. 6, a). In the case of compression of epoxy composite samples with a filler content of 200 wt. parts, the main crack propagates at an angle of 65° (Fig. 6, b).



This indicates the presence of plastic deformation, since the sample is subjected to tangential loads. In this case, the resistance of the epoxy composite material to the influence of static loading decreases. Epoxy composite samples containing 150 wt. parts of the filler particles larger than 0.5 mm fail with the formation of a main crack located at an angle of 50° (Fig. 7, a). In the case of failure of epoxy composite samples with a filler content of 200 wt. parts, the main crack is located at an angle of 45° (Fig. 7, b). This indicates an increase in the influence of tangential loads, which cause plastic deformation, since such a material has a reduced resistance to static loads.

Conclusions and prospects for further research. Epoxy composite materials with a content of finely dispersed filler (fraction less than 0.5 mm) have the highest compressive strength (360 MPa) when using a filler in an amount of 150 wt. parts, which is associated with a uniform and compact distribution of filler particles.

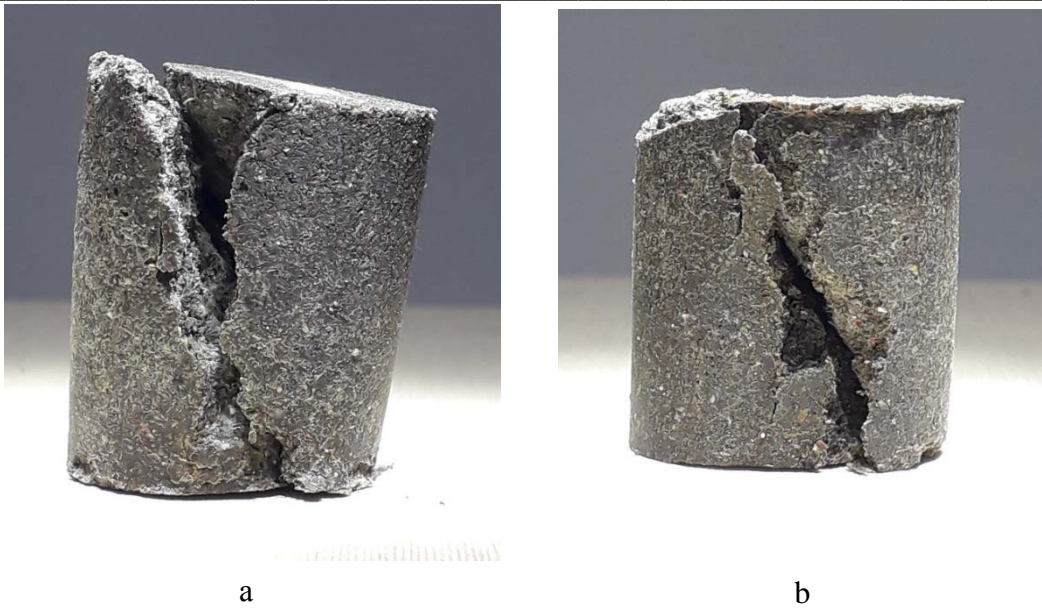


Fig. 6. General appearance of epoxy composite samples after compression with filler content (fraction less than 0.5 mm): a – 150 wt. parts; b – 200 wt. parts.



Fig. 7. General appearance of epoxy composite samples after compression with filler content (fraction more than 0.5 mm): a – 150 wt. parts; b – 200 wt. parts.

With an increase in the temperature of heat treatment to 170° C, the degree of structuring increases to 92%, which is associated with an increase in the rate of chemical reaction and the formation of a larger number of chemical bonds.

The impact strength of epoxy composites increases to its maximum value of 5.7 kJ/m² when epoxy composites are treated at a temperature of 170° C and a filler content of 600 wt. parts, since particles larger than 0.5 mm form obstacles in the epoxy polymer matrix that are able to dissipate kinetic energy better than smaller filler particles.

The compressive strength of biocomposites decrease with increasing particle size and their content in the epoxy polymer matrix. That fact can be explained by the irregular arrangement of filler particles in the volume of the epoxy composite material. In the future, it is planned to carry out a combined treatment

of fiberglass fragments with the additional use of thermal or chemical methods in combination with a mechanical treatment method in order to increase the degree of purification of fibers from the polymer matrix.

References

1. Giorgini L., Leonardi C., Mazzocchetti L., Zattini G., Cavazzoni M., Montanari I., Tosi C., Benelli T. (2016). Pyrolysis of fiberglass/polyester composites: Recovery and characterization of obtained products. *FME Transactions*, 44(4), 405–414.
2. Pickering S. J.: Recycling technology for thermoset composite materials-current status, *Composites Part A*, Vol. 37, pp. 1206-1215, 2006.
3. Conroy A., Halliwell S., Reynolds T. (2006). Composite recycling in the construction industry. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9), 1216–1222.
4. Castro M. A. C., Carvalho J. P., Ribeiro M. C. S., Meixedo J. P., Silva F. J. G., Fiúza A., Dinis M. L. (2014). An integrated recycling approach for GFRP pultrusion wastes: Recycling and reuse assessment into new composite materials using fuzzy Boolean nets. *Journal of Cleaner Production*, 66, 420–430.
5. Neri E., Berti B., Passarini F., Vassura I., Giorgini L., Zattini G., et al. (2018). Application of LCA methodology in the assessment of a pyrolysis process for tyres recycling. *Environmental Engineering and Management Journal*, 17(10), 2437–2445.
6. Silva R. V., Oliveira M. P., Souza F. G. (2020). Recycling of fiberglass reinforced plastics: A review. *Materials Research*, 22(Suppl. 1), e20190389.
7. Oliveux G., Dandy L. O., Leeke G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72, 61–99.
8. Shuaib N. A., Mativenga P. T. (2016). Effect of process parameters on mechanical recycling of glass fibre thermoset composites. *Procedia CIRP*, 48, 134–139.
9. Vladimirov V., Bica I. (2017). Mechanical recycling: Solutions for glass fibre reinforced composites. *Proceedings of the International Symposium “The Environment and the Industry” (SIMI 2017)*.
10. Vladimirov V., Bica I. (2019). Methodology and calculation model for recycling of composite construction products. *E3S Web of Conferences*, 85, 07016.
11. Shuaib N. A., Mativenga P. T. (2016). Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites. *Journal of Cleaner Production*, 120, 198–206.

Дата надходження статті до видання: 05.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

С.В. Ягелюк^[0000-0002-7428-0848]

Луцький національний технічний університет

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ БІОПАЛИВА ІЗ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО: ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Дослідження присвячене розробленню спектрофотометричної методики оцінювання біопаливних матеріалів, отриманих із некондиційних стебел льону олійного (*Linum usitatissimum* L.). Досліджено брикети твердого біопалива з різним співвідношенням біомаси льону та зв'язуючого – сапропелю (L70/S30, L50/S50, L100), а також контрольний зразок на основі деревини. Водні витяжки продуктів згоряння аналізували методом спектрофотометрії в діапазоні довжин хвиль 200–1100 нм. Отримані спектри пропускання продемонстрували подібний загальний характер для всіх зразків, що свідчить про близькі структурні особливості продуктів згоряння. Для всіх досліджених зразків встановлено наявність вираженого мінімуму при довжині хвилі 975 нм. Ця спектральна особливість пов'язана з другим обертоном валентних коливань O–H і відображає наявність гідроксилвмісних сполук та зв'язаної води в досліджуваних системах. Порівняльний аналіз показав, що відмінності значень пропускання між біопаливами на основі льону та контрольним деревинним зразком не перевищують 3–4 %, що свідчить про високий ступінь подібності їхнього хімічного складу продуктів згоряння. Використання сапропелю як зв'язуючого не призводить до істотної зміни загальних спектральних характеристик, однак зумовлює підвищення інтенсивності поглинання через більший вміст мінеральних компонентів. Отримані результати підтверджують доцільність використання біомаси стебел льону олійного для виробництва твердих біопалив та демонструють, що спектрофотометричний аналіз може бути застосований як експрес-метод оцінювання їх якості та екологічної безпечності.

Ключові слова: спектрофотометричний аналіз; спектроскопія; продукти згоряння; лігноцелюозна біомаса; утилізація аграрних відходів; сапропель як зв'язуюче; спектральні маркери; оцінювання якості палива

S. Yaheliuk

SPECTROPHOTOMETRIC METHODS FOR QUALITY ASSESSMENT OF BIOFUEL MATERIALS DERIVED FROM OIL FLAX STEMS: IMPLICATIONS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT

The study is devoted to the development of a spectrophotometric methodology for evaluating biofuel materials produced from non-conditioned oil flax (*Linum usitatissimum* L.) stems. Solid biofuel briquettes with different ratios of flax biomass and sapropel binder (L70/S30, L50/S50, L100) and a control wood sample were investigated. Aqueous extracts of combustion residues were analyzed using spectrophotometry in the wavelength range of 200–1100 nm. The obtained transmission spectra demonstrated similar overall patterns for all samples, indicating comparable structural features of combustion residues. A pronounced minimum at a wavelength of 975 nm was identified for all investigated samples. This spectral feature is attributed to the second overtone of O–H stretching vibrations and reflects the presence of hydroxyl-containing compounds and bound water in the analyzed systems. Comparative analysis showed that the differences in transmission values between flax-based biofuels and the control wood sample do not exceed 3–4%, indicating a high degree of similarity in the chemical composition of their combustion residues. The use of sapropel as a binder does not significantly affect the overall spectral characteristics, although it increases absorption intensity due to higher mineral content. The results confirm the feasibility of using oil flax stem biomass for the production of solid biofuels and demonstrate that spectrophotometric analysis can be applied as a rapid diagnostic tool for assessing their quality and environmental safety.

Keywords: spectrophotometric analysis; spectrophotometry; combustion residues; lignocellulosic biomass; agricultural waste valorization; sapropel binder; spectral markers; biofuel quality assessment

Introduction. The growing demand for renewable energy and sustainable resource utilization has intensified interest in solid biofuels derived from agricultural residues. Among these, oil flax (*Linum usitatissimum* L.) stems represent a promising but insufficiently utilized type of biomass generated in significant amounts after harvesting and primary processing of the crop. Efficient conversion of such non-conditioned biomass into solid fuels requires not only technological solutions but also scientifically substantiated approaches to assessing their quality and environmental safety [1, 2]. Solid biofuel briquettes based on lignocellulosic materials, including flax stems, are extensively studied in the context of renewable energy production due to their availability, renewability, and potential to substitute conventional fossil fuels. Their combustion behavior is determined by physicochemical properties of the raw material, including composition, density, moisture content, and the presence of binders [3, 4]. Natural binders such as sapropel are of particular interest, as they enhance the structural integrity and mechanical stability of briquettes without significantly reducing calorific value. However, the addition of such components may influence the composition of combustion residues, thus requiring detailed analytical evaluation [5]. Traditional methods for evaluating solid biofuels include calorimetric analysis, determination of ash content, volatile matter, and

© С.В. Ягелюк

elemental composition. Although these methods provide integral characteristics of the fuel, they do not allow detailed assessment of changes in the chemical structure of combustion products. In this context, spectrophotometric methods offer an alternative analytical approach, enabling the study of optical properties of combustion products and providing information on their chemical composition based on wavelength-dependent absorption or transmission spectra [6].

Spectrophotometry is widely used in chemical and environmental analysis due to its sensitivity and rapid response. It allows the identification of characteristic spectral features associated with specific functional groups or compounds in liquid extracts [7]. However, its application to the assessment of combustion residues of solid biofuels remains limited, particularly for biomass derived from flax stems. The identification of reproducible spectral patterns may serve as a basis for the development of rapid methods for assessing the quality of solid biofuels.

Despite significant research on biomass combustion and biofuel characterization, there is a lack of systematic approaches that utilize spectrophotometric analysis to evaluate the environmental safety and compositional similarity of combustion residues from different biofuel compositions. In particular, the identification of stable spectral markers common to various types of biomass-based fuels remains an unresolved scientific problem. Therefore, the aim of this study is to develop a spectrophotometric methodology for evaluating solid biofuel materials produced from non-conditioned oil flax stems based on the analysis of transmission spectra of combustion residue extracts, as well as to identify characteristic spectral features that can serve as reliable indicators of fuel quality and environmental safety.

Analysis of recent studies. Recent international studies show that agricultural residues are increasingly regarded as a valuable raw material for renewable energy production, especially in the form of densified solid biofuels. General reviews emphasize that biomass can partly replace fossil fuels, but its practical use depends on the availability of stable feedstocks, appropriate preprocessing, and reliable methods for quality assessment [1], [2]. In this context, densification is considered one of the key technological routes because it improves bulk density, handling, transportability, and combustion performance of plant-derived fuels [3], [4].

A large part of the foreign literature is devoted to the technological factors that determine the quality of densified biofuels. Researchers have shown that the strength and durability of briquettes and pellets depend on particle size, moisture content, compaction pressure, temperature, and the natural binding ability of lignocellulosic components [3]. Review studies also note that densification systems must be adapted to the physical nature of the raw material, since different agricultural residues behave differently during compaction and combustion [4]. This is especially important for flax residues, which are structurally heterogeneous and mechanically different from wood-based biomass.

Another important line of recent research concerns the broader performance of densified biomass fuels, including storage, transportation, end-use efficiency, and market applicability. A later review confirms that the long-term viability of densified solid biomass depends not only on energy properties, but also on technical reliability and user acceptance in practical energy systems [5]. Thus, the literature increasingly moves from general biomass potential toward the integrated evaluation of final fuel products.

At the same time, the body of studies specifically focused on oil flax residues remains much smaller than the general biomass literature. This gap is important because flax residues have specific elastic and structural properties that complicate their processing into compact fuel forms. In particular, Didukh et al. showed that oleaginous flax residues are characterized by pronounced elasticity and rapid shape recovery, which hinder their technological processing, while decortication reduces elasticity and improves the suitability of the biomass for further utilization [8]. This result is directly relevant to fuel production, because reduced elasticity facilitates compaction and helps stabilize the geometry and density of the final solid fuel.

Further development of this research direction is presented in studies devoted to the production of fuel rolls from agricultural stem biomass. Yaheliuk et al. demonstrated that the density of fuel rolls can be optimized through the rational selection of chamber pressure, biomass moisture, and holding time, confirming the importance of controlling technological parameters during fuel formation [9]. In an earlier study, the same research group showed that the combustion efficiency of small-sized fuel rolls made of oleaginous flax residues depends on roll diameter, density, and moisture content; in addition, combustion tests indicated environmentally acceptable performance under properly selected operating conditions [10]. Together, these studies establish the engineering basis for converting flax residues into solid fuels, but they

are focused mainly on production and combustion parameters rather than on the analytical characterization of combustion residues.

A broader economic and resource-use context is also relevant. Analysis of global market trends for grain and industrial crops indicates the growing importance of integrated utilization of agricultural raw materials and residues, including non-food biomass streams [11]. At the national level, the Waste Management Strategy of Ukraine until 2030 also supports more efficient use of waste and secondary raw materials, providing an institutional framework for the valorization of agricultural residues into value-added products, including biofuels [12]. These considerations strengthen the relevance of research aimed at converting non-conditioned flax stems into energy materials instead of treating them as low-value waste.

Despite the considerable progress in biomass densification and combustion studies, the reviewed literature shows that much less attention has been paid to spectrophotometric assessment of combustion residues from flax-based solid biofuels. Most available works focus on feedstock properties, densification conditions, or combustion efficiency [3, 5, 8, 10], whereas analytical approaches for evaluating ash or extract composition through optical spectra are discussed much less frequently in the specific context of flax-derived fuels. Therefore, there is a clear need for a methodology that would complement engineering studies of briquetting and combustion with instrumental assessment of combustion residue extracts. Such an approach may improve comparative evaluation of different briquette compositions and provide an additional basis for judging their environmental safety and similarity to conventional solid fuels.

Thus, the analysis of the reviewed literature indicates that the issues of biomass utilization potential, densification of plant materials, and optimization of combustion processes are relatively well developed. However, methods for spectrophotometric evaluation of combustion residues of solid biofuels produced specifically from non-conditioned oil flax stems remain insufficiently studied. This determines the relevance and necessity of the present research.

The aim of this study is to develop a spectrophotometric methodology for evaluating the quality and environmental safety of solid biofuel materials produced from non-conditioned oil flax stems based on the analysis of transmission spectra of combustion residue extracts, as well as to identify characteristic spectral features that can serve as reliable indicators of fuel properties. The subject of the research is the spectrophotometric characteristics of transmission spectra of aqueous extracts obtained from combustion residues of solid biofuel briquettes with different component compositions.

Materials and Methods. The study was carried out using solid biofuel briquettes produced from non-conditioned oil flax (*Linum usitatissimum* L.) stem biomass. The investigated samples differed in the ratio of flax straw to binder (frozen sapropel): L70/S30 (70% flax biomass and 30% sapropel), L50/S50 (50% flax biomass and 50% sapropel), L100 (100% flax biomass without binder), and a control sample (D) based on wood biomass. Sapropel was selected as a natural binder due to its ability to enhance the structural integrity of briquettes without significantly reducing their calorific value, while its potential influence on combustion products requires detailed analytical evaluation (Fig. 1a). After combustion of the briquettes under controlled conditions, ash residues were collected and used for further analysis. Aqueous extracts of the combustion residues were prepared by mixing a fixed mass of ash residue with distilled water, followed by settling and filtration to obtain clear solutions suitable for spectrophotometric measurements. The prepared extracts were placed in standard optical cuvettes. The prepared aqueous extracts are presented in fig. 1b.

Spectral measurements were performed using a single-beam scanning spectrophotometer (UNICO 2800) operating in transmission mode (T%). The scanning was carried out in the wavelength range of 200–1100 nm. Prior to sample measurements, baseline correction was performed using a blank solution (distilled water) to eliminate background absorption effects. The spectrophotometric measurements were performed using the equipment shown in Fig. 2. The cuvette with the blank solution was placed in the optical path, and the baseline spectrum was recorded, after which the cuvette containing the sample extract was inserted and spectral scanning was conducted.

The scanning parameters were selected according to the instrument capabilities: the scanning step was set to 5 nm for general spectral acquisition and reduced when higher resolution was required, while the scanning speed was adjusted depending on the required resolution. The obtained spectra represent the dependence of light transmission (T%) on wavelength relative to the baseline, allowing comparative analysis of the investigated samples.

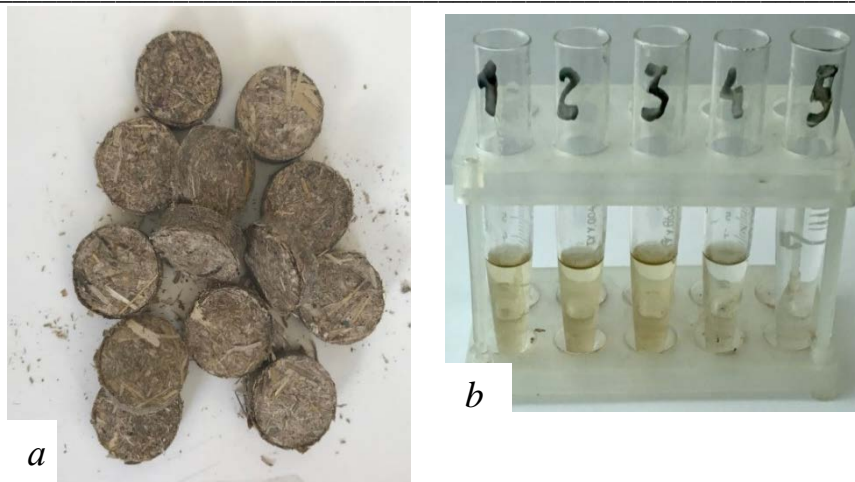


Fig. 1. Biofuel samples and products of their analytical preparation: a – solid biofuel briquettes produced from oil flax stems; b – aqueous extracts of combustion residues obtained from solid biofuel samples



Fig. 2. Spectrophotometer UNICO 2800 used for spectral analysis of combustion residue extracts

The spectral data were processed by identifying local maxima and minima of transmission and determining the corresponding wavelengths using the built-in peak search function of the spectrophotometer. Comparative analysis of spectral curves was performed to detect common patterns and characteristic features across all investigated samples, with particular attention to the identification of stable spectral extrema. This approach enabled the evaluation of similarities and differences in the chemical composition of combustion residues and provided a basis for assessing the quality and environmental safety of solid biofuel materials derived from oil flax stems in comparison with conventional wood-based fuels.

Results. The spectrophotometric analysis of aqueous extracts obtained from combustion residues of solid biofuel briquettes revealed consistent spectral patterns across all investigated samples. The spectra recorded in the wavelength range of 200–1100 nm demonstrated a similar overall shape, indicating the presence of structurally related components in the combustion residue extracts. The transmission spectra of aqueous extracts of combustion residues are presented in Fig. 3. As shown in Fig. 3, all spectra are characterized by smooth curves with several local extrema, which is typical for complex multicomponent systems formed after thermal decomposition of lignocellulosic materials. In the short-wavelength region (200–400 nm), a sharp decrease in transmission is observed for all samples, approaching near-zero values. This behavior is associated with strong absorption of ultraviolet radiation by conjugated organic structures and degradation products of lignocellulosic biomass [13], [14].

In the visible region (approximately 400–800 nm), transmission increases significantly and forms a relatively stable plateau. The spectral curves of all samples are close to each other in this region, although slight differences in transmission levels can be observed. These variations reflect differences in the concentration of absorbing components but do not allow reliable attribution to specific individual compounds, which is typical for multicomponent systems [15].

In the near-infrared region (800–1100 nm), more pronounced spectral features are observed. In particular, slight shifts in local extrema occur in the range of 870–910 nm. The L50/S50 sample shows a shift toward longer wavelengths (around 910 nm), whereas other samples demonstrate extrema closer to 870–895 nm. These variations can be attributed to changes in the mineral composition and structural environment of combustion residues, particularly in samples with increased sawdust content [16].

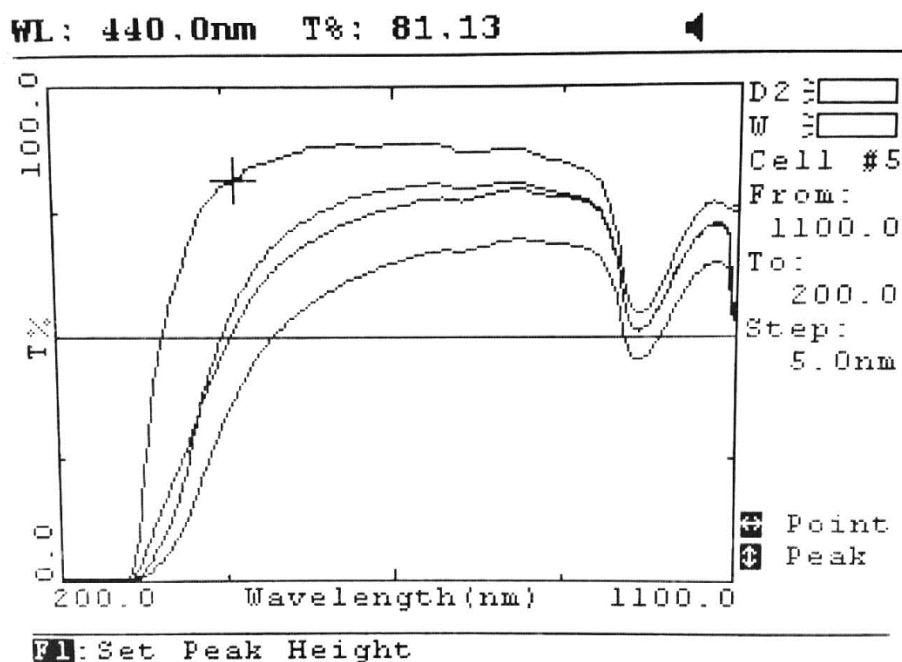


Fig. 3. Transmission spectra of aqueous extracts of combustion residues of solid biofuel samples based on oil flax stems with different binder content (L70/S30, L50/S50, L100) and control sample (D) in the wavelength range of 200–1100 nm

The most significant and consistent feature of all investigated spectra is the presence of a pronounced minimum at a wavelength of 975 nm. This minimum is observed for all samples regardless of their composition, indicating a common absorption mechanism. The transmission values at this wavelength are 51.19% for L70/S30, 45.41% for L50/S50, 51.03% for L100, and 54.63% for the control wood sample.

The spectral feature at 975 nm can be attributed to the second overtone of O–H stretching vibrations, which is characteristic of hydroxyl-containing compounds and bound water in complex systems [15], [17]. The reproducibility of this spectral feature across all samples indicates that it can be considered a diagnostic spectral marker for evaluating solid biofuel materials.

A comparative analysis shows that the differences in transmission values between flax-based samples and the control wood sample do not exceed 3–4%, indicating a high degree of similarity in the chemical composition of combustion residues. At the same time, the L50/S50 sample exhibits the lowest transmission value (45.41%), suggesting a higher concentration of absorbing components, which can be attributed to the increased content of mineral components introduced by the sawdust binder.

At longer wavelengths (around 1070 nm), all samples demonstrate an increase in transmission, indicating reduced absorption and confirming that the dominant absorbing components are active in the shorter near-infrared region. The characteristic spectral extrema identified for all investigated samples are summarized in Table 1.

The data presented in Table 1 confirm that all investigated samples exhibit a common spectral pattern, particularly the stable minimum at 975 nm, which can be considered a universal spectral marker of combustion residues of lignocellulosic biofuels. The similarity of spectral characteristics between flax-

based briquettes and the control wood sample indicates the comparability of their combustion products in terms of chemical composition and supports the possibility of using flax biomass as an alternative energy source without significant changes in the nature of combustion residues. The obtained results are consistent with previous studies [3], [4], which indicate that the properties of solid biofuels are largely determined by the nature of the raw material. At the same time, the present study extends these findings by introducing a spectrophotometric approach for evaluating combustion residues, providing an additional analytical tool for assessing the quality and environmental safety of biofuel materials.

Table 1

Characteristic transmission peaks of combustion residue extracts

Sample	Peak type	Wavelength, nm	Transmission, %	Interpretation
L70/S30	Maximum	540–710	~90–95	Residual organic chromophores
	Maximum	685–815	~92–97	Lignocellulosic structures
	Minimum	975	51.19	O–H absorption
	Maximum	~1070	~95–98	Low absorption
L50/S50	Maximum	540–710	~85–92	Binder influence
	Maximum	700–910	~88–94	Shift due to sapropel
	Minimum	975	45.41	Increased absorption
	Maximum	~1070	~92–96	Reduced absorption
L100	Maximum	540–710	~90–96	Pure biomass
	Maximum	685–815	~92–97	Typical residues
	Minimum	975	51.03	Stable marker
	Maximum	~1070	~95–98	Low absorption
D (wood)	Maximum	540–710	~92–97	Reference material
	Maximum	685–815	~93–98	Wood residues
	Minimum	975	54.63	O–H absorption
	Maximum	~1070	~96–99	Minimal absorption

Conclusions. The conducted study confirmed that solid biofuel briquettes produced from non-conditioned oil flax stems form combustion residues with similar optical properties regardless of binder content. Spectrophotometric analysis of aqueous extracts proved to be an effective and rapid method for evaluating the composition and properties of combustion residues, enabling the identification of characteristic spectral features in the wavelength range of 200–1100 nm. A stable transmission minimum at a wavelength of 975 nm was identified for all investigated samples, including flax-based briquettes and the control wood sample. This feature is attributed to the second overtone of O–H stretching vibrations and can be considered a diagnostic spectral marker. The differences in transmission values between flax-based biofuels and the control wood sample do not exceed 3–4%, indicating a high degree of similarity in the chemical composition of their combustion residues. The use of sapropel as a natural binder (30–50%) does not significantly alter the overall spectral characteristics of combustion products, although it increases absorption intensity due to a higher content of mineral components. The obtained results confirm the feasibility of using oil flax stem biomass as a raw material for solid biofuels with properties comparable to conventional wood-based fuels. The proposed spectrophotometric approach can be applied as a rapid diagnostic tool for comparative evaluation of solid biofuel materials and their environmental safety.

References

1. Demirbaş, A. (2009). Biofuels: Securing the planet's future energy needs. *Energy Conversion and Management*, 50(9), 2239–2249. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.010>
2. McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
3. Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>

4. Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683–707. <https://doi.org/10.1002/bbb.324>
5. Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets*. Earthscan. <https://www.researchgate.net/publication/237079666> The Pellet Handbook The Production and Thermal Utilization of Pellets
6. Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Principles of Instrumental Analysis* (6th ed.). Cengage Learning.
7. Christian, G. D. (2004). *Analytical Chemistry* (6th ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471680575>
8. Didukh, V., Yaheliuk, S., Artyukh, T., Albota, D., Holiy, O. (2022) Decrease of elastic properties of oleaginous flax residues by decortication. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Vol. 67, No. 2. P. 285–292. <https://doi.org/10.35633/inmateh-67-29>
9. Yaheliuk, S., Didukh, V., Fomich, M., Yaheliuk, O., Kuzmina, T., Boiko, G. (2025) Optimization of technological parameters for fuel roll production using agricultural crop stem biomass. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Vol. 75. P. 243–252. <https://doi.org/10.35633/inmateh-75-21>
10. Yaheliuk, S., Didukh, V., Busnyuk, V., Boyko, G., Shubalyi, O. (2020) Optimization on efficient combustion process of small-sized fuel rolls made of oleaginous flax residues. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Vol. 62, No. 3. P. 361–368. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-38>
11. Yaheliuk, S., Fomych, M., Rechun, O. (2024) Global market trends of grain and industrial crops. *Commodity Bulletin*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 134–145. <https://doi.org/10.62763/ef/1.2024.134>
12. National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030: approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 820-r of 08.11.2017. Official legal portal of the Verkhovna Rada of Ukraine.
13. Poletto, M., Ornaghi, H. L., Zattera, A. J. (2014) Native cellulose: structure, characterization and thermal properties. *Materials*. 7, 6105–6119. <https://doi.org/10.3390/ma7096105>
14. Faix, O. (2001) Classification of lignins from different botanical origins by FTIR spectroscopy. *Holzforschung*. 1991, 45(S1), 21–27. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1991.45.s1.21>
15. Workman, J., Weyer, L. (2007) *Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy*. CRC Press. <https://www.researchgate.net/publication/250420699> Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy By Jerry Workman Jr and Lois Weyer
16. Clark, R. N. (1999) Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: *Manual of Remote Sensing*. <https://pubs.usgs.gov/publication/70196852>
17. Osborne, B. G., Fearn, T., Hindle, P. H. (1993) *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis*. Longman, <https://www.cabidigitallibrary.org/action/doSearch?do=Practical+NIR+spectroscopy+with+applications+i+n+food+and+beverage+analysis>.

Дата надходження статті до видання: 07.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

Луцький національний технічний університет¹
 НУ Київський авіаційний інститут²

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ В ПОЛІМЕРКОМПОЗИТАХ ПІД ВПЛИВОМ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ: ОГЛЯД

В статті проведено аналіз літературних джерел в контексті формування полімеркомпозиційних матеріалів під впливом фізичних полів, які забезпечують інтенсивне структурування композиції на основі реактопластів. Подано характеристику фізичних полів та особливості структурних перетворень на рівні тонкої структури та надмолекулярних утворень, які відбуваються в результаті зовнішнього енергетичного впливу. Доведено позитивний вплив фізичних полів на процеси структурування полімеркомпозиційних матеріалів на основі реакційноздатних полімерів за рахунок впорядкування структурних складових, а також формування полімеркомполімерів з низьким напруженням станом та високим ступенем структурування полімерної матриці.

Ключові слова: механічне поле, тепловий вплив, магнітне поле, електромагнітне випромінювання, ультразвукова обробка, сегменти макромолекул, надмолекулярні утворення, хімічні зв'язки.

V. Kashytskyi, P. Savchuk, O. Sadova

CURRENT ISSUES OF STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN POLYMER COMPOSITE MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF PHYSICAL FIELDS: A REVIEW

The article analyzes the literature in the aspect of the formation of polymer composites under the influence of physical fields, which provide intensive structuring of the composition based on thermosets. The characteristics of physical fields and the features of structural transformations at the level of fine structure and supramolecular formations, which occur as a result of external energy influence, are presented. The positive influence of physical fields on the processes of structuring of polymer composite materials based on reactive polymers is proven, which is determined by the processes of ordering structural components and the formation of polymer composites with a low stress state and a high degree of structuring of the polymer matrix.

Key words: mechanical field, thermal field, magnetic field, electromagnetic radiation, ultrasonic treatment, macromolecule segments, supramolecular formations, chemical bonds.

Problem statement. Improvement of physico-mechanical, thermophysical and operational properties of polymer composite materials occurs due to chemical and physical modification of the polymer network of thermosetting plastics under the influence of energy fields: mechanical and thermal fields, permanent magnetic field, electric field, electromagnetic radiation, infrared or ultraviolet rays, radiation rays or a flow of fast electrons, ultrasonic treatment. The effectiveness of physical modification depends on the chemical structure of the polymer, in particular its polarity, which determines the intensity of the structuring process of polymer composite products, increases the productivity of the technological process, provides the opportunity to automate the processing process and eliminate harmful effects on workers, as well as reduce energy costs and reduce the cost of production.

Analysis of recent research and publications.

The classic technological method for improving the physical and mechanical properties of epoxy composite materials is the use of heat treatment. Heat treatment is usually carried out using automation tools, which allows to increase the productivity of the technological process [1]. With increasing temperature, physical bonds in the epoxy binder are destroyed, which creates conditions for additional structuring. Under the influence of a thermal field, the degree of structuring increases, which is accompanied by an increase in the content of the gel fraction and limitation of the mobility of macromolecules. Therefore, there is a need to increase the temperature of heat treatment to values higher than the glass transition temperature, which increases the mobility of the segments of the epoxy binder macromolecules and leads to a change in the conformational set of the epoxy polymer matrix. At elevated temperatures, the heat treatment process is recommended to be carried out in a stepwise mode [2] to avoid the appearance of residual stresses.

The degree of structuring of epoxy composites depends on the amount of thermal energy, which determines the rate of chemical reaction between the components [3]. At low temperatures, the process of forming a glassy state slows down due to poor diffusion and reduced molecular mobility [4]. During gelation, the rigidity of the skeleton of thermosetting polymer macromolecules increases, which limits the chemical reaction on the side chains. To complete the structuring process, the final temperature of the heat

© В.П. Кашицький, П.П. Савчук, О.Л. Садова

treatment should be 10-15 °C higher than the glass transition temperature. In practice, the temperature of the heat treatment is usually set 50 °C higher than the glass transition temperature, which allows you to reduce the duration of the curing process to two hours or more. However, high curing temperatures directly increase the amount of residual stresses due to the formation of phases with quite different coefficients of thermal expansion (CTE), since a gel fraction is formed in the liquid phase of the binder - a mixture of epoxy resin macromolecules and hardener [5]. Stresses increase as the shrinkage of the structured product increases during cooling from the highest temperature of gel formation to ambient temperature. Polymer composite products based on thermoset polymers are formed under the influence of elevated temperatures, the value of which does not exceed 200 °C, therefore the most common devices for structuring thermosets are resistance furnaces, aerodynamic furnaces and induction furnaces [6]. A significant disadvantage of thermal heating is the appearance of a thermal gradient, which during processing can lead to uneven hardening, an increase in residual stresses and the formation of defects in the formed product.

Structuring in resistance furnaces [7] occurs due to convection processes in the working chamber of the furnace and thermal conductivity of the mold material and polymer composite material, which requires time to equalize the temperature in the volume of the product and the sequence of the structuring process, which begins in the peripheral zone and ends in the central zone of the product. In this case, the product has a higher temperature in the lower part due to the convection distribution of heat flows. Under such conditions, the structure of the polymer composite material is formed in a stressed state, which reduces the mechanical characteristics of the product. The use of aerodynamic furnaces ensures uniform distribution of air flows in the working chamber of the furnace, as a result of which the mold or product is heated simultaneously from all sides, however, the problem of peripheral distribution of thermal energy in the volume of the product is not solved, since energy transfer occurs due to thermal conductivity.

The use of IR radiation [8] in the wavelength range of $76 \cdot 10^{-8}$ - 10^{-3} m provides uniform heating of polymer composite materials to a greater depth, compared to convection heating in resistance furnaces, where heat transfer occurs in the air flow and due to the thermal conductivity of the polymer material. The penetration depth of IR rays depends on the intensity of absorption by the radiation medium, but the efficiency mainly depends on the spectral properties of the IR source and the optical characteristics of the material. It has been experimentally established that phenol-formaldehyde and epoxy resins absorb IR rays well in the wavelength range of $(2.7-4.0) \cdot 10^{-6}$ m. This creates an optimal heat flux and ensures the formation of a given material structure with high mechanical characteristics.

Structuring polymer composite products in the field of IR radiation intensifies the synthesis reaction [9] and ensures the formation of a larger number of ordered areas, compared to convective heating. This is due to the direct absorption of energy quanta by polymer molecules, which causes a simultaneous increase in temperature in the thickness of the product and the formation of stronger bonds between the components of the polymer composite material. Under the influence of IR radiation, the processes of heating the material and hardening are combined, which positively affects the productivity of the product molding process, compared to sequential processes that occur using convective thermal energy supply. The formation of polymer composite materials in the field of IR radiation ensures the free removal of moisture and volatile compounds, since there is no densification of the surface layer.

As a result of the treatment of compositions with constant physical fields, the physicochemical properties improve without changing the chemical composition of epoxy composites [10]. This treatment provides regulation of the parameters of the supramolecular structure of the polymer matrix and oriented distribution of filler particles [11] at the interface of the "matrix – filler" phases. An effective method of processing polymer composite materials is the method of forming a composition in a magnetic field [12], which can act as a catalyst or inhibitor of the polymerization reaction and allows changing the topological structure of polymers with the appearance of heterogeneous characteristics of composites. Magnetic processing of polymer composites usually makes it possible to order the structure of the polymer matrix and significantly increase the strength of materials. After magnetic processing in the viscofluid state, a change occurs in the relaxation, mechanical and other properties of polymers. Processing in a constant magnetic field increases the degree of ordering of macromolecules, reduces the size of crystallites and causes anisotropy of supramolecular formations. Epoxy polymers formed under the influence of a constant magnetic flux have anisotropy of optical-mechanical and elastic characteristics with axes of preferential decrease or increase in the values of mechanical and optical properties. The directions of the anisotropy

axes change their orientation in the direction of the magnetic flux depending on the isomerism and chemical structure of the hardener.

Polymer composites are classified as weakly magnetic materials due to the presence of a benzene ring and the anisotropy of magnetic susceptibility along and across the macromolecules. Under the influence of external physical fields, the topological structure, which consists of a system of physical and chemical bonds between the molecules of the epoxy binder and finely dispersed particles, changes to an ordered structure with the orientation of the macromolecules in the direction of the field lines [13]. The orientation of fragments of macromolecules with high values of the anisotropy of magnetic susceptibility in a uniform constant magnetic field occurs along the lines of force, and in an inhomogeneous field, the orientation is enhanced due to the additional moment that rotates the macromolecules along the field gradient. The orientation of macromolecules of the polymer binder in a magnetic field provides structural ordering due to the orientation of polymer chains [14], due to which the reactive groups of macromolecules come closer together and additional chemical bonds are formed. It has been established that the orientation of macromolecules in a magnetic field is hindered by the thermal motion of particles, in this case the magnetic field does not affect a separate macromolecule, but a diamagnetic segment. During the synthesis process, the energy of interaction of the magnetic field with the crystal increases. Provided that the energy of the magnetic field and thermal energy are commensurate, the orientation of diamagnetic crystals and structural ordering occur, which positively affects the properties of polymer composite materials. In polymers under the influence of a magnetic field, changes also occur at the level of the supramolecular structure, which leads to a change in the size and shape of the globules of the polymer matrix.

In epoxy compositions, during structuring under the influence of a magnetic field, the size of the globules increases, in addition, the restructuring of the globules into linear structures is possible. The mechanism of structural transformation in polymers is conveniently described using the cluster model, which represents the amorphous structure of the polymer in the form of a set of crystalline clusters with an ordered and compacted arrangement of molecules. Under the influence of a magnetic field, the number of clusters increases, as well as their size and the ordering of macromolecules in them [15]. The heat resistance and mechanical characteristics of polymer composite materials, the structuring of which occurred under the influence of a magnetic field, are higher compared to the physical and mechanical characteristics of polymer composites, the formation of which was carried out under the influence of convective heating. This is explained by the formation of stronger physical and chemical bonds between macromolecules in the middle of the cluster, as well as an increase in their number [16]. In work [17], based on the results of the analysis of X-ray structural studies of an epoxy polymer structured in a constant magnetic field, a compaction of the spatial structure of molecules was recorded as a result of the appearance of an orientation effect under the influence of a magnetic field. The epoxy polymer, which is structured under the influence of external physical fields, becomes capable of anomalous thermal expansion and an increase in the density of the composite. At the same time, polymer composites based on epoxy resin containing metal oxide particles, which are structured under the influence of external physical fields, are characterized by lower values of the thermal coefficient of linear expansion, which is explained by the higher density of the polymer network.

In the process of forming the structure of the epoxy polymer under the influence of a magnetic field, a new complex of thermodynamic, thermophysical, thermomechanical properties is formed, and the mechanical characteristics of epoxy composite products also increase [18]. In polymethyl methacrylates, under the influence of an external magnetic field, a crystalline and supramolecular structure that is more resistant to external loads is formed, which is not distinguished by high thermal stability.

In the process of creating composites based on amorphous polyurethane under the influence of a permanent magnetic field, the formation of long-range order in the polymer matrix does not occur, and a decrease in heterogeneity is recorded as a result of the destruction of the system of intermolecular hydrogen bonds [19]. A permanent magnetic field increases the homogeneity of the initial polymers and mixtures, which improves the thermal and thermomechanical properties of the composites. This allows you to expand the scope of application of polymer composites by giving the materials new properties (conductivity, dielectric permittivity). Polymer composites with dispersed ferromagnetic fillers, which are structured under the action of an external permanent magnetic field, have a better ability to orient fragments of macromolecules than composites with a diamagnetic type of filler. In the process of structuring epoxy composite materials under the influence of external fields, the orientation of fragments of macromolecule chains around particles of finely dispersed filler occurs, which increases their mechanical

characteristics [20]. On the surface of ferromagnetic particles under the action of an external magnetic field, a surface layer with a high degree of structuring is formed, which provides an increase in the adhesive and cohesive strength of the epoxy composite material. This is due to the existence of a double electric layer at the phase interface. Most polymers are dielectrics that have the ability to polarize under the influence of an external constant electric field. In the case of a dielectric in an electric field, the centers of gravity of negative and positive charges are displaced relative to their equilibrium positions, resulting in electric polarization of the medium [21]. The following types of dielectric polarization are characteristic of polymers: electronic polarization, which occurs as a result of the displacement of the orbitals of electron motion under the influence of an external field; atomic polarization, which is due to the displacement of atomic nuclei; dipole polarization, which is associated with the thermal motion of macromolecule fragments. The polarization of polymer dielectrics is determined by the number of dipoles per unit volume of the polymer, and also depends on the interaction between macromolecules and the dipole moment of the macromolecule link [22].

Under the influence of an electric field, the neutrality of macromolecules is disturbed and polarization of macromolecule fragments occurs, which is accompanied by the opposition of macromolecules to the formation of an energetically favorable conformation [23]. The packing density of polymer macromolecules after treatment in an electric field increases, which is determined by a higher density and a higher softening temperature. Polymer polarization occurs as a result of the arrangement of macromolecule chain fragments in such a way that their dipole moments and polarized bonds are oriented in the direction of the lines of external field strength.

Uniform distribution of thermal energy in the volume of polymer composite products occurs as a result of the absorption of electromagnetic radiation energy generated by ultrahigh frequency sources [24]. This method provides increased productivity, improves product characteristics, promotes uniformity of the structuring process, reduces the required production space and process control, intensifies the heating process of the polymer composite product, allows you to control the temperature, and also stops the heating process after turning off the source of electromagnetic waves [25]. Processing of epoxy compositions without a hardener using high-frequency electromagnetic pulse irradiation allows you to predictably control the processes of structure formation and increase the performance characteristics of epoxy composites.

Electromagnetic heating of conductive metals occurs as a result of the action of a magnetic field, and heating of dielectric polymers occurs under the influence of an electric field. During processing in a high-frequency electromagnetic field, better temperature control is provided compared to thermal curing [26]. Polymers with low moisture content and at low temperatures exhibit dielectric properties, however, in the case of increasing moisture content or heating, the polymers become semiconductors. This determines the dominant influence of the electric or magnetic component of the electromagnetic field. Heating of polymers occurs as a result of direct absorption of energy by the material due to the movement of ions and oscillations of dipoles with the frequency of oscillations of the electromagnetic field without changes in the structure of molecules. During the influence of a high-frequency electromagnetic field, a simultaneous and uniform increase in temperature occurs throughout the volume of a homogeneous material due to the dissipation of the electric field energy, since dielectric energy losses occur, which are associated with overcoming the interaction of polarized molecules [27] of polymers.

Processing of polymers in an ultrahigh-frequency electromagnetic field provides intensive heat generation in the material, and the heating is uniform throughout the volume of the material. In addition, since the energy is supplied directly to the material, the heat energy consumption for heating the equipment is reduced, as well as heat losses for convection and radiation from the mold surfaces. In an electromagnetic field, with increasing field frequency, the dielectric constant decreases, which indicates an increase in the degree of structuring and the formation of a denser spatial network [28]. Under the influence of high-frequency treatment, polymerization occurs by a step mechanism, polymerization with ring opening, and also radical polymerization [29]. As a result of the influence of a high-frequency electromagnetic field, the physicochemical and tribological properties of polymer composites improve due to the ordering of the supramolecular structure of the polymer matrix [30].

The authors of [31] conducted a study of the influence of an ultrahigh-frequency electromagnetic field on the strength and thermomechanical characteristics of epoxy composites. Graphite-filled epoxy composites after treatment in an electromagnetic field have a strength that corresponds to the strength values of epoxy composites structured by the thermal method. A significant advantage of structuring in a field of ultrahigh-frequency currents is the reduction of the process duration.

In [32], a positive effect of ultrahigh-frequency treatment on the adhesion and strength characteristics of epoxy composites was determined. At the optimal time of electromagnetic treatment of the plasticized epoxy matrix, the adhesion strength increases by 35%, compared with untreated epoxy polymer samples. The increase in this characteristic occurs due to the formation of radicals and an increase in the number of paramagnetic centers in the binder under the influence of electromagnetic treatment. In the process of structuring, radicals and paramagnetic centers recombine, which leads to the formation of additional physical bonds with the surface of the metal substrate.

The high intensity of the structuring process is determined by the rate of formation of active centers [33] under the influence of radiation. This processing method is convenient in the technological process, since it allows you to control with high accuracy the initialization of the structuring process, the speed and temperature of the reaction as a result of changing the intensity of the energy flow. A significant disadvantage of the method is the high sensitivity of the polymer matrix to the intensity of radiation. The use of fillers leads to the absorption of part of the energy, which as a result will not be enough for polymerization, however, in the case of an increase in the radiation dose, the mechanical properties of the polymer composite material deteriorate and the destruction of the polymer matrix is possible. The use of a stream of accelerated electrons as radiation radiation allows the use of large doses of radiation, since the stream of electrons interacts directly with atoms and electrons of the substance, as a result of which their kinetic energy is lost. This has a positive effect on increasing the productivity of the processing of polymer composite products, however, the depth of the layer in which the structuring processes occur under the influence of the flow of accelerated electrons does not exceed 2 mm. In this case, it is necessary to form products using layer-by-layer application of a polymer binder, which limits the unification of the application of processing for different technologies for forming polymer composite products. In the case of electron irradiation of polyethylene at lower absorption doses, the degree of crystallinity decreases, and at higher absorption doses, this degree increases. Electron irradiation at low absorption doses leads to simultaneous processes of destruction of the main chain and side branches, as well as to crosslinking of polyethylene macromolecules [34].

The effect of elastic vibrations of the sonic and ultrasonic frequency ranges on liquids allows for the widespread use of such vibrations to intensify technological processes (dispersion, emulsification and preparation of suspensions, mixing of various components, polymerization) during the production of polymer composite materials [35]. Ultrasonic vibrations provide a high level of dispersion, while increasing the interfacial surface of the reacting components. The use of mechanical vibrations of the ultrasonic range or low-frequency ultrasonic vibrations (vibration treatment) is one of the dominant methods in the production of classical polymer composites and nanocomposites and the most promising means of physical modification of liquid epoxy resin or solid components used in chemical technology to intensify technological processes for structuring epoxy composite products [36].

High-frequency sound treatment of the composition before hardening provides a more ordered and less defective structure, which contributes to increasing the strength of polymers [37]. Ultrasonic treatment improves the conditions for homogenization of the mixture, sharply reduces the viscosity of the composition and improves the hardening kinetics of epoxy composites. Treatment of the composition with ultrasonic vibrations ensures the formation of a less stressed structure of epoxy composites, which indicates a minimal exothermic effect and a more homogeneous nature of structuring, since the relaxation processes occur at maximum speed [38]. As a result, ultrasonic treatment allows you to increase the adhesive strength, deformation-strength and operational characteristics of polymer composite materials, as well as reduce the level of residual stresses [39]. This type of treatment contributes to the manufacture of defect-free and monolithic structures from reinforced polymer composites, which is determined by the ability of low-frequency ultrasound to destroy agglomerates of nanodispersed particles and ensure uniform distribution of the filler in the volume of the polymer matrix.

The author of the work [40] determined that one of the promising directions for creating protective polymer composite coatings with high physical and mechanical characteristics is the treatment of the composition with external physical fields. Ultrasonic treatment allows to increase the adhesive strength by 25-30%, the impact strength by 50% and to reduce the heat treatment temperature by 20-30%. The optimal treatment mode in an alternating electromagnetic field at a frequency of 40 MHz for 2-3 min was determined, as a result of which the adhesive strength increases by 4-8 MPa. Treatment of the composition in a field of ultrahigh frequency currents improves the process of structure formation and allows to reduce

the residual stresses of the coatings by 20-25%, which occurs due to the formation of a dense and homogeneous spatial epoxy polymer network and the passage of relaxation processes. Complex treatment in external physical fields allows to additionally increase the adhesive strength by 15-20% and reduce residual stresses by 30%.

In [41], the need for complex ultrasonic and high-frequency electromagnetic treatment of epoxy binder containing ferromagnetic nanodispersed filler was identified. The influence of physical fields ensures spatial orientation of the filler and a high degree of structuring of the composite due to the formation of a uniformly distributed spatial network of epoxy polymer.

Treatment of epoxy compositions in a viscous-fluid state with ultraviolet rays in low doses for short periods of time leads to cracking of macromolecule chains [42], which will occur for the following reasons:

- due to ultraviolet irradiation of the epoxy composition, the potential energy of the heterogeneous system increases, which is accompanied by a change in interatomic distances and valence angles in the macromolecular chains. The increase in the internal energy of the system causes the localization of potential energy in individual sections of the macromolecular chains. This leads to the formation of an active state in such sections, which is characterized by increased stress and destruction of chemical bonds. In this case, there is a redistribution of potential energy between the oligomer macromolecules;

- ultraviolet treatment of epoxy compositions is carried out in an air environment, in which oxygen molecules are acceptors and are able to interact with the atoms of the main chain. The interaction of oxygen molecules with oligomer macroradicals leads to the formation of stable peroxides, which cause the destruction of the epoxy resin macromolecule chains;

- the introduction of dispersed mineral additives also accelerates the destruction of macromolecules as a result of a change in the conformation of macromolecules and the initiation of free radicals. Important in this case is the magnetic and chemical nature of the dispersed filler, as well as the topology of its surface. Active centers that are formed on the surface of dispersed particles under the action of ultraviolet radiation are not necessarily localized near it, since this is not always energetically advantageous. This leads to a change in the position and movement of the polymer macromolecule node, which causes the isomerization of the macroradical.

As a result of experimental studies, a positive effect of the influence of acceptors of different nature on the formation of radicals and the structure formation of composites during ultraviolet treatment was determined [43]. The formation of free radicals occurs as a result of the complex effect on macromolecules of oligomers of ultraviolet radiation and thermal treatment of filler particles, which leads to an increase in the chemical and thermodynamic activity of the dispersed filler. During ultraviolet treatment, the increase in the number of free radicals provides an increase in the degree of structuring of the binder in the outer surface layers, which significantly improves the physical and mechanical properties of epoxy composite materials.

Treatment of epoxy compositions with ultraviolet rays provides an increase in the rate of structuring of the matrix and a significant increase in the degree of gelation of the material [44]. The results obtained are determined by the formation of active free radicals, which intensively interact with the surface of the filler and macromolecules of the matrix. Ultraviolet treatment of the matrix intensifies the process of structure formation, which leads to an increase in the stiffness of the composite.

In [45], as a result of preliminary irradiation of epoxy resin with ultraviolet light, there is a decrease in the adhesion strength of coatings regardless of the physical nature of the finely dispersed filler. At the same time, ultraviolet irradiation of epoxy compositions leads to an increase in the cohesive strength of coatings, which is due to the formation of outer surface layers of a certain thickness around finely dispersed particles.

As a result of complex treatment (ultraviolet irradiation and magnetic treatment) of the composition [46], the cyclic strength of epoxy composite coatings increases. Treatment with ultraviolet irradiation of epoxy resin followed by magnetic treatment of the composition provides an increase in the endurance limit of the “substrate - coating” system by 1.8-2.0 times, compared to the untreated system.

One of the main tasks in the process of forming epoxy composites is to ensure optimal conditions for physicochemical interaction at the “binder-filler” phase interface. An important stage in solving such a problem is to obtain information about the interfacial interaction of binder macromolecules with active centers on the surface of mineral filler particles during the process of forming the material, as well as determining the influence of this interaction on the properties of epoxy composites during operation.

Conclusions. Physical modification of polymer composite materials consists in processing compositions at the structuring stage with energy fields, which increases the intensity and productivity of the process of forming polymer composite products, and also provides the opportunity to automate and shorten the processing process, which allows eliminating harmful effects on workers and reducing energy costs.

As a result of processing an epoxy composition in a thermal field, physical bonds are destroyed, which leads to a decrease in viscosity and an increase in the mobility of segments of macromolecules of the epoxy binder with a subsequent change in the conformational set. Thermal treatment of epoxy composites is regulated by an optimal temperature-time regime, which provides a high degree of structuring of the system with low residual stresses. A significant disadvantage of thermal structuring is the uneven distribution of thermal energy in the volume of the polymer composite product, which leads to an increase in the level of the stressed state and a decrease in mechanical characteristics.

A more effective method of structuring is the irradiation of the composition with infrared rays, which are able to penetrate to a greater depth and initiate the process of forming a network structure with stronger chemical bonds.

Under the influence of magnetic treatment, the parameters of the supramolecular structure of the polymer matrix are adjusted and the filler particles are oriented at the interface of the “matrix-filler” phases, which allows the structure to be ordered due to the orientation of macromolecules in the direction of the magnetic flux. This ensures the approximation of the reactive groups of the epoxy binder with the formation of additional chemical bonds.

Epoxy resin macromolecules are polarized in an electric field, which is determined by the displacement of the centers of electric charges, as a result of which the packing density of the polymer network increases, conformational transformations occur and the interaction between macromolecules improves.

Processing of compositions in a microwave field provides uniform absorption of electromagnetic radiation energy, which is accompanied by heat generation as a result of overcoming the interaction of polarized polymer macromolecules. Such processing provides the formation of a denser spatial network, increases the uniformity of the structure and intensifies the process of structuring epoxy composites.

The use of radiation irradiation methods allows structuring without hardeners, however, polymer systems are quite sensitive to the intensity of such an energy field, which complicates the process of forming epoxy composite products.

Ultrasonic treatment is advisable for compositions containing highly dispersed fillers, which provides a high degree of dispersion of components and uniformity of the structure of polymer composites with a lower content of defects.

Under the influence of ultraviolet radiation, the number of free radicals increases, which significantly increase the degree of gelation of the material and the degree of structuring of the binder in the outer surface layers.

The scientific approach and practical implementation of the processes of structuring epoxy composite products consists in determining the optimal treatment mode of the composition of a given composition in energy fields, which will allow obtaining the predicted structure of the polymer matrix and forming an epoxy composite material with high performance characteristics.

References

1. Stukhlyak P., Mykytyshyn A., Chykhira I. (2020). Investigation of Heat Stepping Process for Epoxy-Amine Binders. *Advances in Materials Science and Engineering* Volume, 4973673.
2. Leonova N.G., Mikhal'chuk V.M., Mamunya Y.P., Davydenko V.V., Iurzhenko M.V. (2013). Thermophysical properties of epoxy-polysiloxane composites of cationic polymerization, *Polymer Science Series D*, 6(3), 210-217.
3. Hubbard R. L., Ahmad I., Tyler D. R. (2016). The Dynamics of Low Stress Epoxy Curing. *SMTA International Proceedings*, 305-312.
4. Pascault J.-P., Sautereau H., Verdu J., Williams R.J.J. (2002). Editors. *Thermosetting Polymers*, Marcel Dekker, Inc.: New York.

5. Kamon T., Furukawa H. (2005). Curing mechanisms and mechanical properties of cured epoxy resins. *Advances in Polymer Science*, 80, 173-202.
6. Dzhur Ye. O., Kuchma L. D., Manko T. A., Sytalo V. I. (2003). *Polymeric composite materials in rocket and space technology: Textbook*. Kyiv: Vyscha osvita.
7. Buketov A. V., Saprionov O. O., Aleksenko V. L. (2015). *Epoxy nanocomposites: Monograph*. Kherson: KhDMA.
8. Le Maoult Y., Schmidt F. (2016). Infrared Radiation Applied to Polymer Processes. In: Boyard, N. (ed). *Heat Transfer in Polymer Composite Materials*, John Wiley & Sons, 385-423.
9. Genty S., Tingaut P., Aufray M. (2018). Fast Polymerization at Low Temperature of an Infrared Radiation Cured Epoxy-Amine Adhesive. *Thermochimica Acta*, 667, 27-35.
10. Bardadym Yu. V., Vilenskyi V. O. (2016). Structure and physical properties of polymer composite materials formed in constant magnetic and electric fields. *Polymer Journal*, 389(2), 115-124.
11. Mamunya Ye. P., Vasylenko S. L., Lebedev Ye. V., Shut, M. I. (2002). Electrical and adhesive properties of electrically conductive polymer compositions. *Issues of Chemistry and Chemical Technology*, 3, 210-212.
12. Buketov A.V., Skirdenko V.O. (2014). Effect of Pulsed Magnetic Field on Properties of Epoxy Nanocomposites.. *Strength of Materials*, 46, 717-723.
13. Vilenskyi V. O., Kercha Yu. Yu., Honcharenko L. A., Demchenko V. L. (2012). On the "relaxation structure" of filled epoxy polymers. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 4, 128-137.
14. Demchenko V. L., Shtompel V. I., Riabov S. V., Unrod V. I. (2013). Influence of magnetic field on the structure and properties of polymers and their composites *Scientific News of NTUU "KPI"*, 4, 114-120.
15. Vilenskyi V. O., Honcharenko L. A., Hlieva H. Ye., Vilenska L. M. (2006). Structure and dielectric properties of metal-containing naturally renewable copolymers subjected to constant magnetic field. *Polymer Journal*, 28(3), 201-208.
16. Vilenskyi V. O., Bardadym Yu. V., Riabov S. V., & Dmytriieva T. V. (2013). Thermophysical properties and thermal destruction of nanocomposites cured in constant physical fields. *Scientific News of NTUU "KPI"*, 5, 107-114.
17. Vilenskyi V. O. (2024). *Polymers: synthesis, modification, research: A textbook*. Zhytomyr: Zhytomyr Ivan Franko State University Press.
18. Vilenskyi V. O., Bardadym Yu. V., Tkalych M. H. (2015). Influence of properties of metal oxide fillers on dynamic-mechanical characteristics of mesocomposites formed in constant physical fields. *Scientific News of NTUU "KPI"* 6, 87-94.
19. Hlieva H. S., Vilenskyi V. O., Kercha Yu. Yu., Honcharenko L. A. (2007). Comparative study of the influence of composition and physical fields on the structure and thermophysical properties of urethane-containing polymer composites. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 7, 129-135.
20. Buketov A. V., Stukhliak P. D., Kalba Ye. M. (2005). Physicochemical processes in the formation of epoxy composite materials. *Ternopil: Zbruch*. P. 182.
21. Kim GeunHyung, Shkel Y.M. (2004). Polymeric Composites Tailored by Electric Field. *Journal of Materials Research*, 19(4), 1164-1174.
22. Cummings E.B., Griffiths S.K., Nilson R.H., Paul PH. (2000). Conditions for Similitude between the Fluid Velocity and Electric Field in Electroosmotic Flow. *Analytical chemistry*, 72(11), 2526-2532.
23. Tonkopieva L. S., & Syromiatnikov V. H. (2005). Structural transformations of polymer systems during annealing in an electric field. *Polymer Journal*, 27(4), 249-254.
24. Demura A. L. (2006). Use of an ultrahigh-frequency electromagnetic field in the technological process of manufacturing products from polymer composite materials. *Bulletin of Engine Building*, 4, 76-79.
25. Bogdal D., Penczek P., Pielichowski J., Prociak A. (2023). Microwave Assisted Synthesis, Crosslinking, and Processing of Polymeric Materials. *Advances in Polymer Science*, 163. 51-58.
26. Yusoff R., Aroua M.K., Nesbitt A., Day R.J. (2007). Curing of Polymeric Composites Using Microwave Resin Transfer Moulding (RTM). *Journal of Engineering Science and Technology*, 2(2), 151-163.

27. Vilenskyi V. O., Demchenko V. L. (2008). Influence of the nature of dispersed fillers on the structure, thermophysical properties, and electrical conductivity of epoxy resin-based composites. *Polymer Journal*, 30(2), 131–138.
28. Demura A. L. (2012). Dependence of the dielectric permittivity of fiberglass on curing temperature under the influence of UHF electromagnetic field. *Bulletin of Dnipropetrovsk University*, 2(19), 138–143.
29. Hoogenboom R., Schubert U. (2004). Microwave assisted polymer synthesis: recent developments in a rapidly expanding field of research. *Macromolecular Rapid Communications*, 25, 1739.
30. Azharonok V.V., Anisovich A.G., Biran V.V. (2014). Changes in the physical and mechanical properties of friction composites with a polymer matrix induced by an amplitude-modulated high-frequency electromagnetic field. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 50, 300–305.
31. Bilohubka O. R., Shyichuk O. V. (2008). Influence of microwave field on the kinetics of polymerization of epoxy oligomer in the presence of dimethylbenzylamine. *Polymer Journal*, 30(4), 293–296.
32. Stukhliak P. D., Holotenko O. S., Skorokhod O. Z. (2015). Influence of ultrahigh-frequency electromagnetic treatment on the properties of epoxy composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/5(73), 32–37.
33. Smyrnov V. H., Lebedev D. A. (2020). Radiation-induced crosslinking of epoxy composites: Mechanical and electrical properties. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(1), 45–52.
34. Nychyparenko O. S., Dmytrenko O. P., Kulish M. P., Pinchuk-Ruhul T. M., Hrabovskyi Yu. Ye., Zabolotnyi M. A., Bulavin L. A., Mamunya Ye. P., Levchenko V. V., Strelchuk V. V., Kutsai O. M., Shlapatska V. V. (2015). Radiation-stimulated transformations of structure and vibrational spectra of polyethylene. *Nuclear Physics and Energy*, 16(4), 367–373.
35. Kolosov O. Ye., Sivetskyi V. I., & Panov Ye. M. (2012). Mathematical modeling of basic processes of manufacturing polymer composite materials using ultrasonic modification. *Edelweiss Publishing House*, 268 pp.
36. Kolosov A.E., Kolosova E.P., Vanin V.V., Khan A. (2017). Ultrasonic Treatment in the Production of Classical Composites and Carbon Nanocomposites. *Chinese Journal of Polymer Science*, 35(11), 1381–1390.
37. Buketov A. V., Stukhliak P. D., Chykhira I. V. (2011). Properties of ultrasound-modified epoxies. *Ternopil: Krok*, 201 pp.
38. Buketov A., Smetankin S., Maruschak P., Yurenin K., Sapronov O., Matvyeyev V., Menou A. (2020). New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships, *Transport*, 35(6), 679–690.
39. Kolosov O. Ye. (2018). *Technologies of composite materials: A textbook*. Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 255 pp.
40. Holotenko S. (2010). Physico-mechanical properties of protective polymer composite coatings filled with dispersed fillers subjected to external physical fields. *Bulletin of TNTU*, 15(3), 23–29.
41. Kalba Ye. M., Holotenko S. M., Harmatiuk R. T., Holotenko O. S. (2011). Study of specific resistance of electrically conductive coatings based on epoxy matrix and polydisperse carbon fillers. *Scientific Bulletin of KhDMI*, 1(4), 183–189.
42. Buketov A. (2005). Ultraviolet activation of physicochemical processes during the formation of epoxy composites. *Bulletin of TDTU*, 10(2), 21–33.
43. Stukhliak P. D., Buketov A. V. (2009). Epoxy composite materials modified by ultraviolet irradiation. *Ternopil: Zbruch*, 237 pp.
44. Buketov A. V., Stukhliak P. D. (2004). Structural modification of epoxy composites by ultraviolet treatment. *Bulletin of KNUTD*, 2, 10–19.
45. Buketov A. V., Stukhliak P. D., Dobrotvor I. H., Mytnyk M. M., Dolhov M. A. (2009). Influence of the nature of fillers and ultraviolet irradiation on mechanical properties of epoxy composite coatings. *Strength of Materials Problems*, 4, 117–123.
46. Stukhliak P. D., Buketov A. V., Dobrotvor I. H. (2008). Epoxy composite materials modified by energy fields. *Ternopil: Zbruch*, 208 pp.

Дата надходження статті до видання: 07.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

ПЕРЕДУМОВИ ДО ВРАХУВАННЯ МОДИФІКАЦІЇ ХВОЙНИХ ПОРІД ДЕРЕВИНИ В РОЗРАХУНКАХ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ

Дослідження висвітлює методологію врахування впливу модифікації хвойних порід деревини при розрахунках дерев'яних конструкцій. Воно зосереджено на конструктивних елементах, включаючи балки, колони та перехресно-ламіновані панелі, де подовження міцність значною мірою визначає несучу здатність та жорсткість. Запропоновано методологію, що дозволяє точно враховувати зміни механічної поведінки внаслідок обробки композиційними матеріалами, забезпечуючи точну оцінку міцності та покращення експлуатаційної придатності дерев'яних конструкцій. Впровадження коефіцієнтів у структурні розрахунки демонструє, що модифікація може значно підвищити експлуатаційні характеристики та термін служби дерев'яних конструкцій. Цей підхід закладає основу для включення модифікованих властивостей деревини в майбутні стандарти проектування та надає інженерам практичні інструменти для більш надійного та довговічного проектування дерев'яних конструкцій.

Ключові слова: модифікована деревина, напружено-деформований стан, міцність, несуча здатність, деформівність, стиск, згин, розтяг.

O.O. Homon, O.M. Suvorov

PREREQUISITES FOR TAKING INTO ACCOUNT MODIFICATIONS OF CONIFERS OF WOOD SPECIES IN CALCULATIONS OF TIMBER ELEMENTS AND STRUCTURES

The study highlights the methodology for considering the impact of softwood modification in the design of timber structures. Although timber is a widely used building material due to its environmental friendliness, low weight, ease of processing, high longitudinal strength and cost-effectiveness, it has limitations such as moisture sensitivity, anisotropy and natural defects that limit its structural application. Modification of timber with various composite materials improves the physical and mechanical properties of timber, improves moisture resistance and increases durability. Such types of modifications change the behaviour of timber structures and their stress-strain state, which is not taken into account in current design standards, which highlights the need to update design approaches. The study focuses on structural elements, including beams, columns and cross-laminated panels, where longitudinal strength largely determines the load-bearing capacity and stiffness. Traditional design includes characteristic and design values of compressive, tensile, and flexural strengths, as well as elastic and shear moduli modified by reliability factors. This paper presents the possibility of using experimental data when taking into account the modification of coniferous wood species. In this case, experimental values are used to determine modification factors that correct the design resistance to bending, compression, tensile, and elastic moduli. Formulas are given to illustrate the application of these factors under uniaxial bending and combined loading conditions. A methodology is proposed that allows for accurate consideration of changes in mechanical behavior due to processing with composite materials, providing an accurate assessment of the strength and improved serviceability of wooden structures. The introduction of these factors into structural calculations demonstrates that modification can significantly improve the performance and service life of wooden structures. This approach lays the foundation for incorporating modified wood properties into future design standards and provides engineers with practical tools for more reliable and durable wood construction designs.

Key words: modified wood, stress-strain state, strength, load-bearing capacity, deformation, compression, bending, tension.

Постановка проблеми. Використання деревини як матеріалу для будівельних конструкцій обумовлено великою кількістю переваг [1,2]. До основних переваг деревини можна віднести її екологічність, невелику вагу, легку обробку, високу міцність вздовж волокон, невеликі витрати при виготовленні та інші. Проте не зважаючи на велику кількість переваг для деревини характерні і недоліки, до яких можна віднести: чутливість до високої вологості, анізотропію, природні недоліки (сучки, косошаруватості) та інші [1,2]. Саме недоліки обмежують використання деревини як конструктивного матеріалу.

Для покращення експлуатаційних властивостей, подолання недоліків деревини, можливе застосування модифікації деревини за допомогою різних композитних матеріалів [3-10]. Саме просочування деревини дозволяє створити матеріал, який поєднує переваги природної деревини та штучного композиту, підвищуючи фізико-механічні властивості, зменшуючи вплив вологості а також підвищує довговічність деревини. При цьому вплив модифікації змінюючи фізико-механічні властивості деревини, змінює напружено-деформований стан конструкцій [4]. Врахування такої зміни в сучасних нормативних документах відсутня [11,12], тому одною із задач нашого дослідження стало створити передумови для врахування в розрахунках дерев'яних конструкцій модифікації деревини хвойних порід різними композиційними матеріалами.

© О.О. Гомон, О.М. Суворов

Аналіз останніх досліджень. В сучасному будівництві деревину зазвичай використовують у вигляді довгих стержнів (балки, колони) або (перехресно-клеєні панелі, панелі з використанням фанери), при цьому орієнтація деревини виконуються вздовж волокон, це дозволяє сприймати більші навантаження. Саме міцність деревини вздовж волокон є визначальною характеристикою несучої здатності та жорсткості будівельних конструкцій. Тому в нормативній літературі [11-13] можна знайти такі характеристики деревини, які використовуються в проектуванні:

$f_{c,0,d}$, $f_{m,k}$ - розрахункове та характеристичне значення міцності при стиску вздовж волокон;

$f_{c,90,k}$ - характеристичне значення міцності при стиску поперек волокон;

$f_{m,d}$ - розрахункове значення міцності при згині;

$f_{t,0,d}$, $f_{t,0,k}$ - розрахункове та характеристичне значення міцності при розтягу вздовж волокон;

$f_{t,90,d}$ - розрахункове значення міцності при розтягу поперек волокон;

E_d , E_{mean} - розрахункове та середнє значення модуля пружності;

G_d , G_{mean} - розрахункове та середнє значення модуля зсуву.

Якщо зобразити можливе виникнення навантаження та опір, який необхідний для запобігання руйнування, його можна зобразити у вигляді двох сукупностей (рис. 1). Незважаючи на присутність міцнісних лімітів на згин, розтяг та стиск в розрахунок вводять ряд коефіцієнтів, які залежать від умов експлуатації та тривалості навантаження. Такими коефіцієнтами є [11-13]: k_{mod} - коефіцієнт, який вводить для розрахункових опорів, що служить врахуванню тривалості дії навантаження, а також при яких умовах експлуатується конструкція; k_{def} - коефіцієнт деформативності, який враховує реологічні властивості деревини, а саме повзучість. Роботу коефіцієнтів надійності можна зобразити у вигляді схеми (рис. 2).

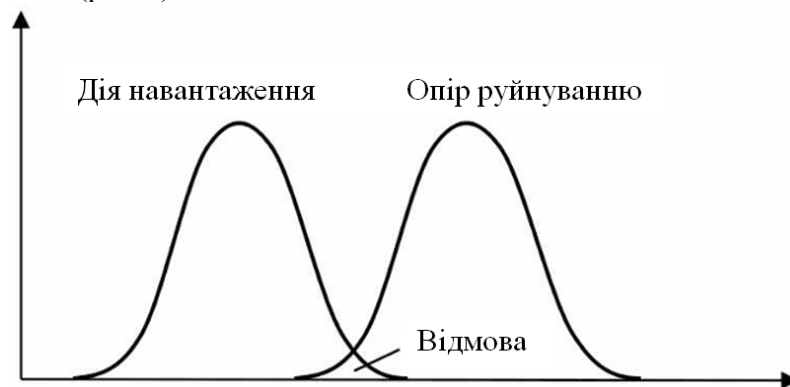


Рис. 1. Розподіл дії навантаження та опору руйнування

Саме використанням великої кількості коефіцієнтів (рис. 2) обумовлює пружну частину роботи деревини, це пояснюється невеликими рівнями навантаження при яких використовується деревина.

Постановка завдання. Метою наших досліджень є розробка методики врахування в розрахунках дерев'яних конструкцій модифікації деревини хвойних порід різними композиційними матеріалами, за допомогою отриманих нових фізико-механічних характеристик.

Виклад основного матеріалу. З досліджень встановлено, що модифікація збільшує модуль пружності деревини вздовж волокон, а також збільшує опір деревини стискаючим напруженням. Тоді вплив модифікації можна розглянути, як співвідношення отриманих модулів пружності деревини формула (1)

$$\gamma_{mod,E} = E_{mean,mod}/E_{mean} \quad (1)$$

де E_{mean} - середнє значення модуля пружності деревини вздовж волокон;

$E_{mean,mod}$ - середнє значення модуля пружності вздовж волокон модифікованої деревини.

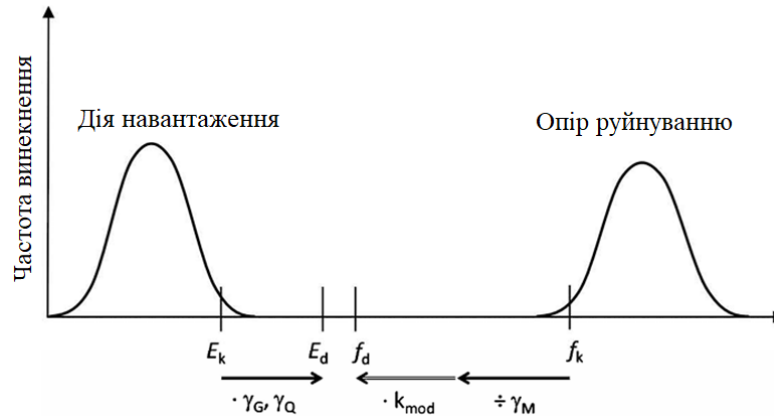


Рис. 2. Схематичне зображення запобігання руйнування конструкцій ($\gamma_M, \gamma_G, \gamma_Q$ - коефіцієнти надійності)

Так само як і для модуля пружності можна встановити вплив на міцність деревини при стиску. Коефіцієнт врахування $\gamma_{mod,f}$ впливу на розрахунковий опір при стиску можна визначити за формулою (2)

$$\gamma_{mod,f} = f_{k,mod}/f_k \quad (2)$$

З врахуванням того, що співвідношення розрахункових опорів можна визначити згідно [13], за формулою (3), то можливо стверджувати, що при такому співвідношенні коефіцієнт впливу на модифіковану деревину $\gamma_{mod,f}$ можна використовувати, як для розрахункового опору згину, так і розтягу

$$f_{t,0,k} = 0,6f_{m,k} \quad (3)$$

Так, врахування модифікації при розрахунках можливо шляхом використання коефіцієнтів $\gamma_{mod,f}$ та $\gamma_{mod,E}$.

Приклад використання коефіцієнтів модифікації

Розглянемо спосіб застосування коефіцієнтів при розрахунку згинальних конструкцій. Так для визначення несучої здатності згинальних елементів використовується формула (4) для одноосьового згину

$$\sigma_z = \frac{M_y \cdot z}{I_z} \quad (4)$$

де σ_z - напруження при дії згинального моменту M_y ;

I_z - момент інерції відносно осі z .

Умовою ж запобігання руйнування є формула (5), яка вказує що перевищення напружень більше дозволених розрахункових, може спричинити руйнування конструкції

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (5)$$

Врахування модифікації деревини враховується шляхом введення в розрахунковий опір коефіцієнта, що враховує модифікацію (6)

$$f_{m,d} = K_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \gamma_{mod,f} \quad (6)$$

При комбінації на сприйняття зусиль на згин з стиском та на згин з розтягом застосовують рівняння відповідно рівняння (7), (8) та (9), (10)

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (8)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (9)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (10)$$

Як для простого згину врахування модифікації епоксидною смолою буде проводитись у формулах (11), (12) та (13), (14):

$$f_{t,0,d} = K_{mod} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_m} \gamma_{mod,f} \quad (11)$$

$$f_{c,0,d} = K_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} \gamma_{mod,f} \quad (12)$$

$$f_{m,y,d} = K_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_m} \gamma_{mod,f} \quad (13)$$

$$f_{m,z,d} = K_{mod} \frac{f_{m,z,k}}{\gamma_m} \gamma_{mod,f} \quad (14)$$

З врахуванням вище згаданої інформації застосування коефіцієнтів $\gamma_{mod,f}$ та $\gamma_{mod,E}$ є можливим під час розрахунку та проектування конструкцій з деревини.

Висновки

1. Встановлено, що модифікована деревина є сучасним матеріалом, який має покращені фізико-механічні властивості, підвищену вологостійкість та довговічність.

2. Проаналізовані літературні джерела показали, що врахування модифікації деревини можна виконати при встановленні розрахункових опорів деревини. При цьому врахування модифікації буде враховуватись за допомогою двох коефіцієнтів модифікації $\gamma_{mod,f}$ та $\gamma_{mod,E}$.

3. В роботі наведені способи застосування коефіцієнтів модифікації при розрахунку конструкцій, які працюють на стиск та згин. Встановлено, що при застосування коефіцієнтів можна врахувати вплив модифікації деревини хвойних порід при розрахунку таких конструкцій.

Список використаних джерел

1. Вінтонів І.С., Сопушинський І.М., Тайшінгер А. Деревинознавство: навчальний посібник. Львів: Априорі, 2007. 312 с.
2. Гомон О.О., Чапюк О.С., Савчук С.М. Використання клеєної деревини у промисловості. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, 2024. Вип. 22, С. 15–22.
3. Довбенко Т.О., Петренко О.В., Чапюк О.С., Гомон О.О. Аналіз способів модифікування деревини. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. Рівне, 2024. Вип. 4(108). С. 12–20.
4. Гомон О.О. Моделювання роботи дерев'яних балок модифікованих епоксидною смолою після впливу одноразових та малоциклових навантажень методом скінченних елементів. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2025. Vol 4 (4). P. 56–68.
5. Kysliuk D.Y., Homon O., Chapiuk O., Talakh L., Skrypnyk M., Polishchuk-Herasymchuk T., Sokil P., Kulakovskiy L., 2026. Mechanical characteristics of epoxy-modified wood: an experimental study. *Procedia Structural Integrity* 81, 430-433.
6. Матвіюк О.В. Покращення механічних властивостей конструкційної деревини за експлуатації в агресивних середовищах: дис. ...к.т.н. 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 165 с.
7. Цапко Ю.В., Ліхнівський Р.В. Дослідження структури модифікованої деревини. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. Київ, 2013. Вип. 49. С. 170–174.
8. Горбачова О.Ю., Пінчевська О.О. Термічне модифікування деревини граба: монографія. Київ, 2017.
9. Довбенко Т.О., Гомон Св.Св., Матвіюк О.В., Павлюк А.П. Модифікація деревини екологічно чистими матеріалами. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки»*. Рівне: НУВГП, 2023. Випуск 1 (101). С. 134-142.
10. Бехта П.А., Салабай Р.Г. Класифікація деревинних композиційних матеріалів. *Наукові праці лісівничої академії наук України*. Львів: НЛТУ, 2002. Вип. 1. С. 114-117.
11. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ: Укрархбудінформ, 2017. 111 с.
12. Eurocode 5. (2004). Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings. 124 p.
13. ДСТУ EN 384:2022. Конструкційний лісоматеріал. Визначення характеристичних значень механічних властивостей та щільності. К.: Мінрегіон України, 2023.

Дата надходження статті до видання: 07.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

О.В. Вдовиченко¹^[0000-0002-4096-8118], М.П. Гадзира¹, І.Д. Гнилиця²^[0000-0001-8182-1457], А.М. Колесников¹,
О.В. Талько¹, Н.Д. Ткачук¹, А.М. Висоцький¹

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України¹
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу²*

УЛЬТРАЗВУКОВІ НЕРУЙНІВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЙНО СПЕЧЕНОГО КАРБІДУ КРЕМНІЮ, МОДИФІКОВАНОГО КАРБІДОМ ВОЛЬФРАМУ

За технологією реакційного спікання порошків отримані керамічні матеріали на основі карбіду кремнію, що містили в шихті від 1 до 8% (мас.) частинок порошку карбіду вольфраму. Досліджено вплив вмісту карбіду вольфраму на закономірності зміни питомого електричного опору та характеристик пружності композитів, визначених за результатами ультразвукових вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль різних типів імпульсними методами.

Ключові слова: реакційне спікання, карбіди, ультразвуковий контроль, електричний опір.

O.V. Vdovychenko, M.P. Gadzyra, I.D. Hnylytsia, A.M. Kolesnykov, O.V. Talko,
N.D. Tkachuk, A.M. Vysotskyu

ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE STUDY OF REACTION-SINTERED SILICON CARBIDE MODIFIED WITH TUNGSTEN CARBIDE

Using the technology of reactive sintering of nanosized powders, composite materials based on silicon carbide, containing in the charge from 1 to 8% (wt.) of tungsten carbide powder particles were fabricated. The influence of the WC content in the charge on the regularities of changes in the electrical resistivity and elastic characteristics of composites, determined from the results of ultrasonic measurements of the propagation velocities of elastic waves of various types using pulse methods, was investigated.

Key words: reaction sintering, carbides, ultrasonic testing, electrical resistivity

Вступ. Керамічні матеріали на основі карбіду кремнію (SiC) демонструють видатні властивості, такі як високі твердість, міцність та теплопровідність, стійкості до окиснення і корозії, низький коефіцієнт термічного розширення. Завдяки цьому застосовуються для виготовлення ущільнювачів, броньових пластин, підшипників, гільз циліндрів і форсунок двигунів, та напівпровідникових виробів, які в процесі експлуатації піддаються дії високих температур, ударних та циклічних навантажень [1, 2]. Втім, консолідація порошку чистого SiC є складним завданням внаслідок міцних ковалентних зв'язків та малих коефіцієнтів дифузії атомів і тому вимагає температури спікання понад 2773 К і тиску 50 МПа. Зниження температури спікання SiC в твердій фазі можна домогтися додаванням вуглецю та інших хімічних сполук, але отримані керамічні вироби мають низьку тріщиностійкість [3]. Іншим способом зменшення температури консолідації є реакційне спікання з утворенням багатофазного композитного матеріалу [2, 4]. Зокрема, таким способом одержують композити системи SiC-WC, функціональні властивості яких можна регулювати зміною вмісту вихідних компонентів [3, 5, 6]. Проте, внаслідок різного коефіцієнта термічного розширення різних фаз, в процесі виготовлення виникають залишкові напруження, які можуть призвести до утворення тріщин, а отже до погіршення механічних характеристик і навіть втрати цілісності.

Мета роботи. Метою цієї роботи є дослідження неруйнівними ультразвуковими (УЗ) методами впливу зміни вмісту WC в шихті до 8% (мас.) на можливе утворення дефектів в реакційно спечених електропровідних матеріалах на основі нанорозмірних порошків твердого розчину карбону в карбіді кремнію, технологія виготовлення яких розроблена в ІПМ НАН України та описана в [7, 8].

Матеріали і методи досліджень

Формування зразків проводили з зеленого карбіду кремнію фракції 30-40 мкм з додаванням 12% електродного графіту фракції 20-30 мкм та нанопорошку WC з питомою поверхнею ~ 4 м²/г у кількості від 1% до 8% (мас.) з кроком 1%. Як пластифікатор був використаний 10% розчин порошку бакеліту в етиловому спирті у кількості 3-4 % (мас.). Змішування кожного складу відбувалось у кульовому млині з розмольними тілами з твердого сплаву впродовж близько 1 год. Пресування

© О.В. Вдовиченко, М.П. Гадзира, І.Д. Гнилиця, А.М. Колесников, О.В. Талько,
Н.Д. Ткачук, А.М. Висоцький

зразків проводилося на гідравлічному пресі при питомому тиску 200 кг/см², далі сформовані зразки сушили на повітрі за температури ~ 453 К впродовж 5-6 год. Реакційне спікання сформованих зразків проводили в індукційній печі у вакуумі за температури 2273-2373 К протягом 30 хв., швидкість нагрівання становила ~50 К/хв. Відношення маси вільного кремнію до маси зразків становило 1:1. Внаслідок реакційного спікання були одержані зразки композитної кераміки SiC-Si (W, C), в яких карбід вольфраму повністю прореагував з силіцидів вольфраму у різній концентрації в залежності від вмісту складових в шихті.

Дослідження проводили за кімнатної температури на зразках у формі прямокутних паралелепіпедів з поперечними розмірами 8 ... 16 мм після шліфування. Лінійні розміри зразків вимірювали за допомогою мікрометра з одиницею молодшого розряду 0,01 мм, густину ρ одержаних композитів визначали методом гідростатичного зважування.

Електричні вимірювання проводили за допомогою цифрового мікрометра UNI-T.UT620b.

Характеристики пружності визначали методом наскрізного проходження ультразвукового імпульсу за швидкостями поширення поздовжньої та поперечної (зсувної) пружних хвиль. Метод реалізовувався таким чином. Протилежні грані зразка послідовно вводили в акустичний контакт з двома парами п'єзоелектричних перетворювачів поздовжньої або зсувної хвилі резонансного типу з центральною частотою 5 МГц. Як контактне середовище між зразком і перетворювачами застосовували дистильовану воду у випадку поздовжньої хвилі або мінеральну оливу у випадку зсувної хвилі. На один з перетворювачів (випромінювач) з генератора надходив електричний імпульс прямокутної форми тривалістю 4 мкс і періодом 1 мс і перетворювач збуджував в матеріалі зразка поздовжню або поперечну ультразвукову хвилю. Перетворювач, розташований на протилежній грані зразка, трансформувал акустичний сигнал, що пройшов крізь зразок, знову в електричний, який після підсилення надходив для візуалізації на осцилограф. Інтервал часу Δt між моментами випромінювання та реєстрації ультразвукового імпульсу вимірювали за допомогою вимірювача інтервалів з точністю 1 нс, враховуючи час проходження сигналу по вимірювальному тракту без зразка.

Швидкість поширення поздовжньої V_l та поперечної V_t ультразвукових хвиль визначали як відношення шляху h , на який в зразку поширювався імпульс відповідної хвилі, до часу його поширення Δt . Модулі Юнга E , зсуву G та коефіцієнт Пуассона ν визначали з відомих співвідношень теорії пружності

$$E = \frac{\rho \cdot V_l^2 (3V_l^2 - 4V_t^2)}{V_l^2 - V_t^2}; \quad (1)$$

$$G = \rho V_t^2; \quad (2)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{V_l^2 - 2V_t^2}{V_l^2 - V_t^2}, \quad (3)$$

де ρ – експериментально визначена густина матеріалу зразка.

Швидкості поширення V_l та V_t вимірювали вздовж обох коротких граней (в напрямку пресування та в поперек цього напрямку), щоб забезпечити умови формування відповідних хвиль в пружному середовищі. Похибка ультразвукових вимірювань імпульсним методом не перевищувало 0,5%. Оскільки не було виявлено закономірної різниці між результатами вимірювань у різних напрямках, наведені далі результати одержували осередненням від 4 до 10 незалежних вимірювань часу проходження хвилі кожного типу як в напрямку, так і в площині пресування.

Амплітуди відносних максимальних циклічних деформації, що виникали в зразках під час вимірювань, мали порядок $10^{-8} \dots 10^{-6}$.

Результати досліджень та їх обговорення

Густина. Результати, наведені на рис.1,а вказують на відсутність однозначної залежності густини зразків після реакції ρ від вмісту WC. Густина матеріалу з вихідного порошку твердого розчину карбону в карбіді кремнію становила 3050 кг/м³, що дещо менше ніж відомі з літератури значення густини SiC α - та β -модифікацій $\rho = 3210-3215$ кг/м³ [9], що пов'язано з особливостями технології отримання та структури вихідних порошків. Додавання в шихту 1 – 3% (мас.) карбиду

вольфраму мало наслідком зменшення густини одержаних композитів до 2970 кг/м^3 , а подальше збільшення вмісту WC до 8% (мас.) викликало поступове зростання густини до $3110\text{-}3120 \text{ кг/м}^3$. Так в цілому незначне збільшення ρ пов'язано з великою густиною сполук вольфраму. Так, густина силіциду вольфраму WSi_2 становить близько 9250 кг/м^3 , а карбідів WC та W_2C – 15500 та 17200 кг/м^3 , відповідно [9].

Питомий електричний опір. Результати визначення електричних характеристик досліджуваних композитів, наведені на Рис.1,б, свідчать, що збільшення вмісту карбіду вольфраму в шихті має наслідком зменшення питомого електричного опору ρ^* . Вже після додавання в шихту 1% (мас.) карбіду вольфраму відбувається стрімке падіння ρ^* одержаного матеріалу від $55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ у не модифікованого нанорозмірного твердого розчину карбону в SiC до $21,2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ у матеріалу, модифікованого 1%(мас.) WC. Це більш як вдвічі менше, ніж у дослідженого авторами цієї статті матеріалу на основі SiC, модифікованого 1%(мас.) TiC, який становив $49,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [10]. Зі зростанням концентрації WC в шихті від до 2% (мас.) електричний опір зменшується до $15 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а подальше збільшення вмісту WC має наслідком зростання ρ^* з максимумом за 5%(мас.) W і наступне його падіння до $\rho^*=11,1 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ у матеріалу з 8%(мас.) WC.

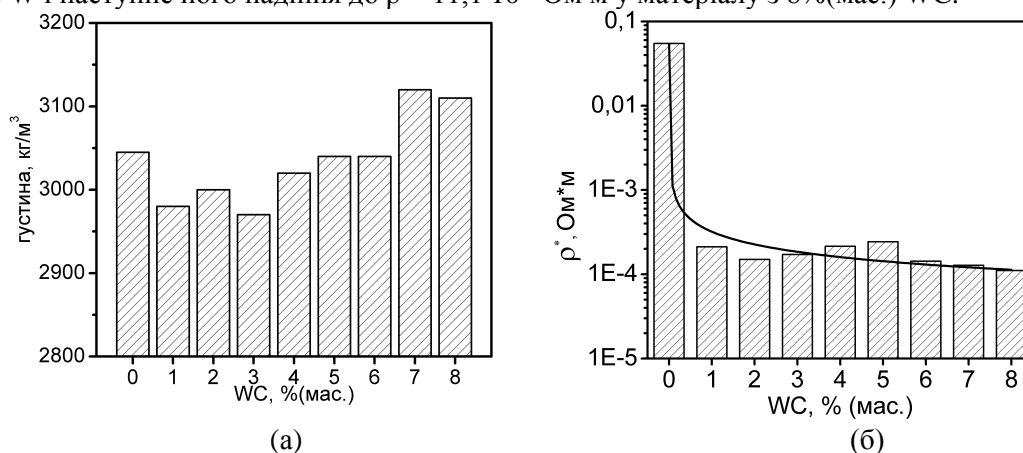


Рис.1. Залежності (а) - густини ρ та (б) - питомого електричного опору ρ^* матеріалів на основі SiC, модифікованих WC від масового вмісту карбіду вольфраму в шихті

З літератури відомо, що у порівнянні з іншими карбідами, стехіометричний карбід вольфраму має низькі значення питомого електричного опору, який за кімнатної температури становить $\rho^*_{\text{WC}} = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [11], а ρ^* полікристалічного карбіду кремнію лежить між $3,5 \cdot 10^{-5}$ і $3 \cdot 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в залежності від хімічного складу модифікаторів і технологічного процесу [2]. Отже, встановлені нами залежності загалом підтверджуються відомими даними. Втім, фізичні механізми, які контролюють електричний опір реакційно спечених матеріалів на основі нанорозмірних порошків SiC та WC вимагають окремого дослідження.

Результати ультразвукових досліджень.

Швидкість поширення УЗ хвиль. Результати, наведені на рис.2 свідчать, що додавання в шихту 1% (мас.) карбіду вольфраму викликає суттєве зменшення швидкостей як поздовжньої, так і зсувної пружних хвиль – більш як на 6% до 10574 м/с , та більш як на 8% до 5875 м/с , відповідно. Тенденції подальшої зміни обох швидкостей зі збільшенням вмісту WC загалом збігаються – спостерігається мінімум швидкостей УЗ хвиль в матеріалі SiC-4%WC ($V_l = 10268 \text{ м/с}$ та $V_t = 5680 \text{ м/с}$) з подальшим деяким збільшенням їхніх значень. Досить істотне розсіювання результатів експериментальних вимірювань пов'язане, ймовірно, з анізотропією пружності матеріалів в напрямку і перпендикулярно до осі прикладання зусилля пресування. Подібна анізотропія спостерігалась нами у матеріалів, модифікованих карбідом хрому [12]. Питання формування анізотропії властивостей у керамічних, зокрема, композитних матеріалів в процесі реакційного спікання вимагає окремого докладного дослідження.

Модулі пружності. Результати визначення модулів Юнга E , зсуву G та коефіцієнта Пуассона ν в композитів за результатами імпульсних ультразвукових вимірювань за формулами (1-3) наведені на рис.3.

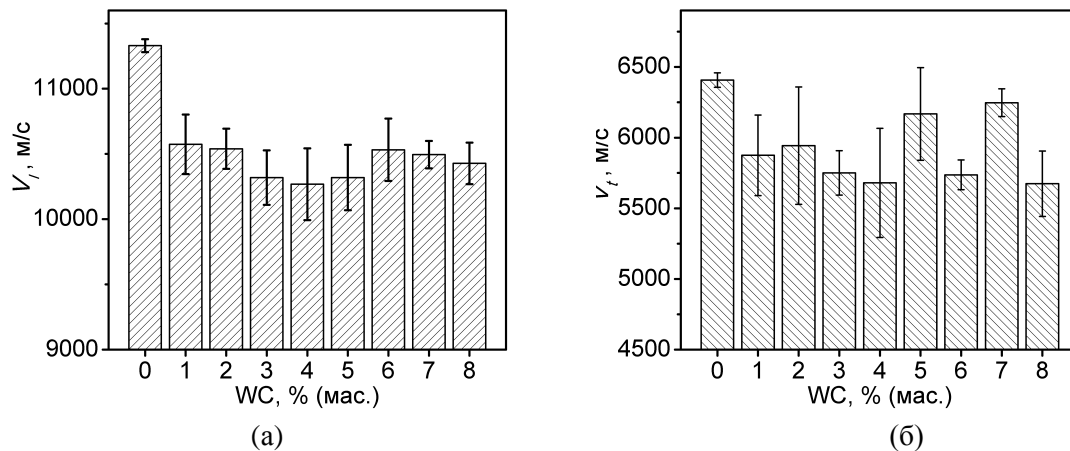


Рис.2. Залежності швидкостей поширення (а) – поздовжньої V_1 та (б) - поперечної V_t ультразвукових хвиль від масового вмісту карбиду вольфраму в шихті

Було встановлено, що значення модуля Юнга та модуля зсуву мають однакову тенденцію зміни зі збільшенням вмісту карбиду вольфраму, а саме: 1) суттєво зменшуються внаслідок додавання 1% (мас.) модифікатора; 2) мають мінімум за концентрації WC в шихті 4% (мас.) (Рис.3, а, б). Звертає на себе увагу той факт, що зміна коефіцієнта Пуассона протилежна: додавання 1% WC викликає збільшення ν з 0,22 у не модифікованого SiC до 0,27; 2) відносно більшим значенням модулів E та G відповідають відносно менші значення коефіцієнта Пуассона (Рис.3, в).

Автори роботи [13] спостерігали схожу екстремальну залежність модуля Юнга композитів системи SiC-4,3% Al₂O₃-5,7% Y₂O₃-TiC, одержаних рідкофазним спіканням, з максимумальним значенням E у композита з SiC-4,3% Al₂O₃-5,7% Y₂O₃-5%TiC (скрізь наведено проценти за масою). На думку авторів [13] такий характер залежності обумовлений пористістю. Однак, порівняння змін густини, питомого електричного опору та характеристик, що були визначені за допомогою ультразвукових вимірювань вказують, що найбільш ймовірною причиною зміни цих характеристик, зокрема характеристик пружності композитів, крім пористості можуть бути двовимірні дефекти (мікротріщини), що виникають внаслідок дії залишкових напружень між фазами, що утворюються в процесі реакційного спікання.

Загалом зменшення модулів пружності модифікованих композитів може бути пов'язане з утворенням силіцидів, оскільки карбиди вольфраму мають більш високі характеристики пружності, ніж SiC [9]. Зміни характеристик пружності є істотними і не можуть бути пояснені простим статистичним розсіюванням механічних характеристик, властивим керамічним матеріалам. Це, зокрема, підтверджується фактом узгодженої зміни значень E , G та ν , визначених за результатами незалежних вимірювань швидкостей поширення ультразвукових хвиль двох типів. Анізотропія пружності, що спостерігалась, вочевидь є наслідком анізотропії структури фаз композитів, яка зумовлена власне процесом просочування впродовж реакційного спікання, що суттєво впливає на орієнтацію кристалів.

Відзначений хід залежності коефіцієнта Пуассона дещо відрізняється від зміни коефіцієнта Пуассона, який автори спостерігали в композиті, одержаному реакційним спіканням твердого розчину карбону в карбіді кремнію з карбідом титану в якості модифікатора, де значення ν падали при додаванні 1% TiC до 0,20, далі зростали до 0,28 у SiC-3%(мас.)TiC, і нарешті стрімко падали до 0,15 [10].

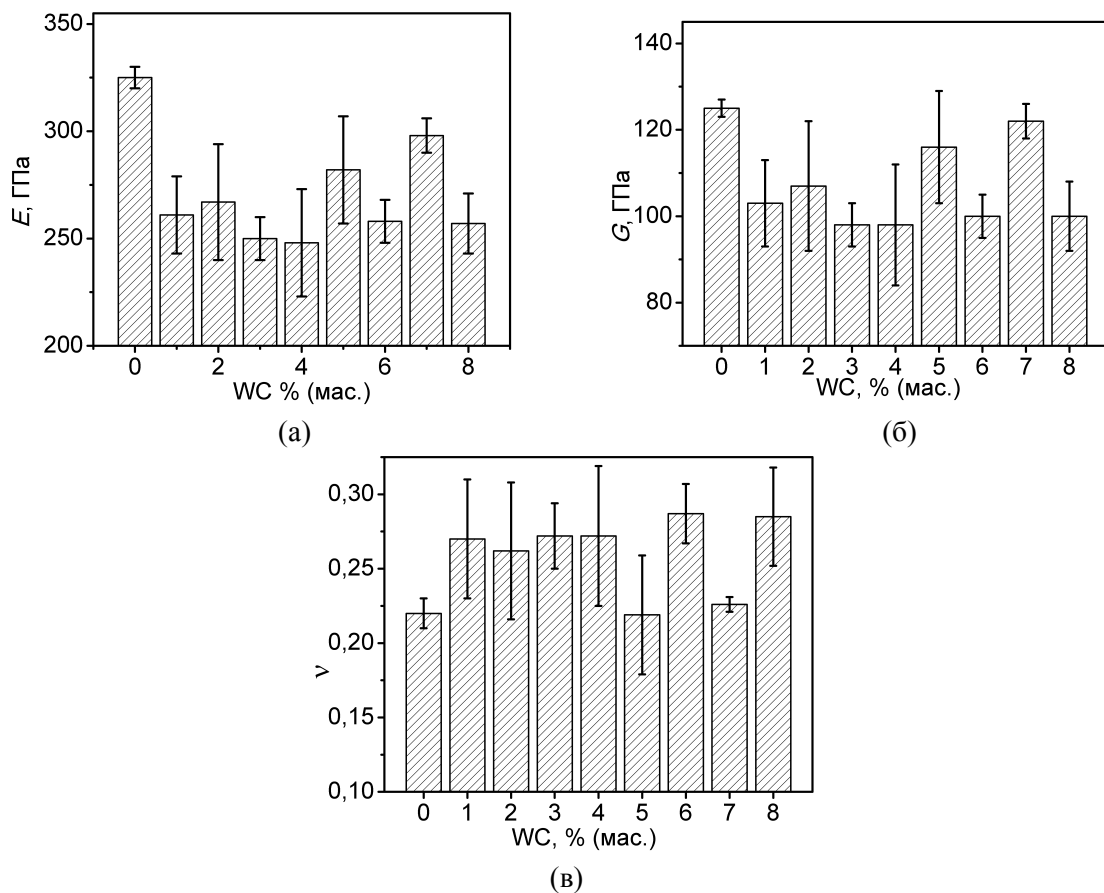


Рис.3. Залежності модуля Юнга E (а), модуля зсуву G (б) та коефіцієнта Пуассона ν (в) композитів від масового вмісту WC в шихті

Висновки

1. Методом реакційного спікання було одержано наноструктурні композити на основі SiC, що містили в шихті від 1 до 8%(мас.) карбїду вольфраму. Встановлено, що густина одержаних композитів при додаванні в шихту 1-3% (мас.) WC дещо зменшується, а при подальшому збільшенні вмісту модифікатора зростає до 3120 кг/м^3 , що перевищує густину матеріала-основи, що свідчить про формування сполук вольфраму високої густини.

2. Додавання вже мінімальної кількості модифікатора стрімко знижає питомий електричний опір одержаного матеріалу до $1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а збільшення вмісту WC дозволило знизити цю характеристику до $5,0 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

3. Модифікація дозволила зменшити характеристики пружності одержаних нанорозмірних матеріалів. Модулі Юнга та зсуву, визначені ультразвуковими методами, демонструють мінімум у матеріалів, які містять 4% (мас.) WC у шихті. Це може бути пов'язано з утворенням фаз з фізико-механічними властивостями, відмінними від матеріалу-основи, і ця різниця може викликати залишкові напруження і ініціювати утворення мікротріщин, які у свою чергу впливають на згадані характеристики.

4. Одержані результати відкривають напрямок одержання композитів на основі твердого розчину карбону в карбїді кремнію з покращеними експлуатаційними властивостями.

Список використаних джерел:

1. Anwar M.S., Lee H.J., Ha J.-H., Lee J., Song I.-H. Microstructure, electrical, thermal, and permeability properties of recrystallised SiC: Effects of sub-micron-sized SiC and sintering temperature. Ceram. Int. 51 (2025) 25138–25148. doi: 10.1016/j.ceramint.2025.03.195

2. Kim Y.-W., Kim Y.-H., Kim K. J. Electrical properties of liquid-phase sintered silicon carbide ceramics: a review. *Crit. Rev. Solid States Mater. Sci.* 45 (2020) 66-84. doi: 10.1080/10408436.2018.1532394
3. Chen Z., Gan Z., Huang S., Hu N., Li D. Effect of co-addition of tungsten carbide and cobalt on mechanical properties of SiC matrix composites. *Int. J. Refract. Met. H.* 134 (2026) 107485. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2025.107485
4. Gadzyra N.F., Gnesin G.G., Mykhaylyk A.A. Mechanism for the formation of a solid solution of carbon in silicon carbide. *Powder Metall. Met. Ceram.* 40 No. 9–10 (2001) 519–525. doi: 10.1023/A:1014352009750.
5. Sharma S.K., Kumar B.V.M., Zugelj B.B., Kalin M., Kim Y.-W. Room and high temperature reciprocated sliding wear behavior of SiC-WC composites. *Ceram. Int.* 43 (2017) 16827-16834. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.09.080.
6. Tan Z., Zhang M., Zhao S., Huang Y., Huang Z. Microstructure, mechanical and friction-wear properties of SiC-WC composite with Al and C as sintering aids. *J. Eur. Ceram. Soc.* 44 (2024) 3557-3568. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.01.009.
7. Gadzyra N.F., Gnesin G.G., Mykhaylyk A.A. Mechanism for the formation of a solid solution of carbon in silicon carbide. *Powder Metall. Met. Ceram.* 40 No. 9–10 (2001) 519–525. doi: 10.1023/A:1014352009750.
8. Пінчук М.О., Гадзира М.П. Дослідження мікроструктури реакційно спеченого карбїду кремнію, модифікованого карбїдом хрому. *Порошкова металургія* (2019) № 11/12 С. 57-62. doi: 10.1007/s11106-020-00123-у
9. Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов / Под ред. И.Н. Францевича. К.: Наук. думка, (1982) 288 с.
10. Вдовиченко О.В., Гадзира М.П., Колесников А.М., Ткачук Н.Д., Гнилиця І.Д. Динамічна пружність та електричний опір реакційно спеченої нанорозмірної кераміки SiC – TiC. *Наукові нотатки. Міжвуз. зб. Луцького національного технічного університету* (2024) № 79-80, С.132-136. doi: 10.36910/775.24153966.2024.79.21
11. Williams W.S. Electrical properties of hard materials. *Int. J. Refract. Met. H.* 17 (1999) 21-26. doi: 10.1016/S0263-4368(99)00005-0.
12. Талько О.В., Колесников А.М., Висоцький А.М., Ткачук Н.Д., Пінчук М.О., Вдовиченко О.В., Гадзира М.П. Вплив характеристик вихідних порошків на швидкості поширення пружних хвиль в реакційно спечених композитах SiC-Cr₃C₂. *Наукові нотатки. Міжвуз. зб. Луцького національного технічного університету* (2024) № 79-80, С.119-122. doi:10.36910/775.24153966.2024.79.18
13. Khodaei, M., Yaghobizadeh, O., Safavi, S.A., Ehsani, N., Baharvandi, H.R., Esmaeeli, S. (2020) The effect of TiC additive with Al₂O₃-Y₂O₃ on the microstructure and mechanical properties of SiC matrix composites. *Adv. Ceram. Progr. Vol.6*, pp. 15 – 24. doi: 10.30501/acp.2020.109546.

Рецензент: Штерн Михайло Борисович, завідувач відділу, д.т.н., чл.-кор. НАН України
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

Дата надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

С.М. Баранович¹[0000-0001-8671-6517], І.Г. Стукалець¹[0000-0001-7107-4865], С.В. Коробка¹[0000-0001-7521-6306], М.М. Толстушко²[0000-0001-9230-3831], Н.О. Толстушко²[0000-0001-8811-7868]

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького

²Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗАКРИТОМУ ПЕРЕПУСКНОМУ КАНАЛІ ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ З РІЗНИМ СПІВВІДНОШЕННЯМ СТОРІН

У статті досліджено науково-прикладну задачу визначення гідрогазодинамічних параметрів потоку в закритих каналах із прямокутним поперечним перерізом. Обґрунтовано, що класичні аналітичні залежності, засновані на законі Гагена-Пуазейля, є адекватними виключно для каналів круглого перерізу, тоді як у реальних інженерних системах переважають канали прямокутної або складнішої геометрії. Перевірку аналітичних результатів здійснено шляхом чисельного моделювання у програмних середовищах MATLAB та SOLIDWORKS Flow Simulation. Побудовано функціональні залежності швидкісних і витратних характеристик від геометричних параметрів каналу.

Ключові слова: гідрогазодинаміка, прямокутний канал, система MATLAB, SOLIDWORKS Flow Simulation.

S. Baranovych, I. Stukalets, S. Korobka, M. Tolstushko, N. Tolstushko

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC AND GAS DYNAMIC PROCESSES IN A CLOSED BYPASS CHANNEL WITH A RECTANGULAR CROSS-SECTION OF VARYING ASPECT RATIOS

The article addresses a scientific and applied problem of determining the hydrodynamic and gas dynamic characteristics of flow in closed channels with a rectangular cross-section. It is substantiated that classical analytical relations based on the Hagen-Poiseuille law are valid exclusively for channels with a circular cross-section, whereas in real engineering systems, rectangular or more complex geometries are predominant. The study presents an analytical investigation of laminar flow of liquids and gases in a rectangular channel based on the Navier-Stokes equations. For the rectangular channel, the solution was constructed using the method of expansion in trigonometric series, which allows proper consideration of boundary conditions and the geometric characteristics of the flow domain. It was established that the flow capacity of the channel depends on the aspect ratio of its sides, with the extreme value of the corresponding coefficient being achieved for a square cross-section. The analytical results were verified through numerical simulations using MATLAB and SOLIDWORKS Flow Simulation. Functional dependencies of velocity and flow characteristics on the geometric parameters of the channel were constructed.

Keywords: hydrodynamics and gas dynamics, rectangular channel, MATLAB system, SOLIDWORKS Flow Simulation.

Постановка проблеми. Класичні підходи до оцінювання витрати в довгих закритих каналах із ламінарним режимом руху рідин і газів ґрунтуються на законі, сформульованому Гаген-Пуазейль, який справедливий для каналів із круглим поперечним перерізом. Проте в реальних конструкціях машин і механізмів з'єднувальні канали між окремими порожнинами рідко мають ідеально круглу форму. Значно частіше їхній переріз є прямокутним, трикутним або наближеним до складнішої геометрії. Через це розрахункові співвідношення, отримані для каналів із круглим поперечним перерізом, не забезпечують достатньої точності й потребують адаптації з урахуванням впливу форми перерізу на гідравлічний опір та розподіл швидкостей потоку. Особливої актуальності така корекція набуває при проектуванні каналів подачі змазувально-охолоджувальної рідини в ріжучому інструменті для металообробних верстатів, де геометрія внутрішніх каналів часто обмежена конструкцією інструмента і технологічними вимогами. У подібних системах навіть незначні відхилення в розрахунку пропускної здатності можуть суттєво впливати на ефективність охолодження, знос інструмента та стабільність процесу різання [1-14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідивши базові теоретичні положення, що описують гідродинамічні явища, які використовуються під час інженерних розрахунків закритих технологічних каналів, слід зазначити, що ключовим параметром у таких моделях виступає K_p – коефіцієнт Пуазейля, на що вказують численні дослідження [3, 4, 8, 10, 11], значення якого визначають за відповідною залежністю:

$$K_p = \pi D^4 / (128 \eta l), \quad (1)$$

де D – діаметр каналу, м; η – коефіцієнт в'язкості, Па·с; l – довжина каналу, м.

© С.М. Баранович, І.Г. Стукалець, С.В. Коробка, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко

Використання цього коефіцієнта під час визначення гідравлічних і газодинамічних параметрів потоку в замкнених технологічних каналах є обґрунтованим лише за умови, що канал має круглий поперечний переріз. Саме для такої геометрії отримано класичні аналітичні залежності, які адекватно відображають розподіл швидкостей, втрати тиску та закономірності ламінарного руху середовища.

Якщо ж поперечний переріз відрізняється від круглого – наприклад, є прямокутним, трикутним або має складну конфігурацію, зумовлену конструктивними особливостями вузла, - застосування даного коефіцієнта без уточнень призводить до похибок у розрахунках. Це пояснюється зміною характеру формування прикордонного шару, перерозподілом швидкісного профілю та іншими умовами гідравлічного опору.

У таких випадках необхідним є проведення додаткових теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на встановлення коригувальних залежностей або введення еквівалентних параметрів. Лише з урахуванням реальної геометрії каналу можна забезпечити достатню точність прогнозування витратних характеристик, втрат енергії та стійкості роботи технологічної системи.

Постановка завдань. У сучасному машинобудуванні та приладобудуванні розрахунок гідравлічних і газодинамічних характеристик потоку в закритих технологічних каналах традиційно здійснюється на основі аналітичних залежностей, що містять коефіцієнт Пуазейля. Зазначені співвідношення отримані для умов ламінарного руху рідин і газів у каналах круглого поперечного перерізу та забезпечують достатню точність лише за відповідності реальної геометрії каналу прийнятій теоретичній моделі. Разом із тим у практичних конструкціях технологічні канали часто мають прямокутний, квадратний або трикутний інший профіль перерізу, що зумовлено конструктивними обмеженнями, особливостями компонування вузлів і економічними чинниками виготовлення. Зміна геометрії поперечного перерізу істотно впливає на характер розподілу швидкостей, величину гідравлічного опору та втрати тиску, що, своєю чергою, позначається на точності прогнозування витратних характеристик потоку. У зв'язку з цим виникає науково-прикладна проблема уточнення існуючих розрахункових підходів і розроблення методики визначення гідрогазодинамічних параметрів для закритих каналів довільної форми перерізу.

Викладення основного матеріалу. Проведемо теоретичне дослідження гідравлічних і газодинамічних параметрів закритих каналів із круглим та прямокутним поперечними перерізами [6, 11]. Розрахунки виконуватимуться для умов ламінарного руху робочого середовища з визначенням локального розподілу швидкостей, середньої швидкості потоку та об'ємної витрати як інтегрального показника пропускної здатності. Такий підхід дає змогу кількісно оцінити вплив геометрії каналу на формування швидкісного профілю та величину гідравлічного опору. З метою забезпечення коректності порівняльного аналізу приймемо припущення про однаковість площ поперечних перерізів досліджуваних каналів. Це дозволяє виключити вплив розмірного чинника та зосередитися виключно на ролі форми контуру перерізу в зміні швидкості потоку й продуктивності перетікання рідин і газів.

Для каналу з круглим поперечним перерізом (рис. 1) диференціальна форма рівняння Нав'є-Стокса у полярній системі координат, з урахуванням осьової симетрії потоку [1-3], набуває такого вигляду:

$$\frac{d^2 g}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg}{dr} = -k, \quad (2)$$

де $k = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx}$; η – динамічна в'язкість рідини (газу), Па·с; p – тиск рідини (газу), Па; g –

швидкість перетікання рідин і газів по каналу, м/с.

Розв'язок рівняння 1 набуде наступного вигляду:

$$g = -\left(k \cdot r^2 / 4\right) + C_1 \ln r + C_2. \quad (3)$$

де C_1, C_2 – числові сталі, які дають частковий розв'язок рівняння.

За обмеженої швидкості, $C_1 = 0$, а C_2 визначаємо з граничної умови – $r = a = 0 \rightarrow C_2 = k \cdot a^2 / 4$

Тоді,

© С.М. Баранович, І.Г. Стукалець, С.В. Коробка, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко

$$\vartheta = (k/4)(a^2 + r^2). \quad (4)$$

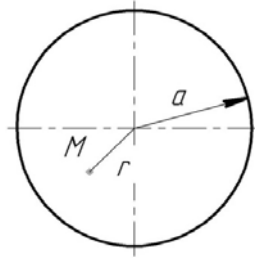


Рис. 1. Схема розрахунку швидкості потоку рідин і газів у круглому каналі
Визначаємо продуктивність за наступною формулою:

$$\begin{aligned} Q &= \iint_A \rho \vartheta dA = \int_0^a \frac{k\rho}{4} (a^2 - r^2) \cdot 2\pi r dr = \\ &= \frac{\pi k \rho}{r} \left(\frac{a^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right) \Big|_0^a = \frac{\pi k \rho a^4}{8}. \end{aligned} \quad (5)$$

Формула для визначення радіуса каналу круглого перерізу матиме вигляд $a^2/\sqrt{\pi}$, а його пропускна здатність:

$$Q = k \rho a^4 / (8\pi) = 0,0398 k \rho a^4.$$

Розрахункова схема для визначення швидкості руху повітря в каналі прямокутного перерізу подана на рис. 2.

Якщо канал прямокутного перерізу, то розв'язок диференціального рівняння:

$$\frac{d^2 \vartheta}{dy^2} + \frac{d^2 \vartheta}{dz^2} = -k, \quad (6)$$

будемо шукати у вигляді одинарного тригонометричного ряду:

$$\vartheta = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(z) \sin \frac{\pi n y}{b}. \quad (7)$$

Кожен доданок цього ряду задовольняє граничні умови: при $y = 0$ $\vartheta = 0$ і $y = b$ $\vartheta = 0$.

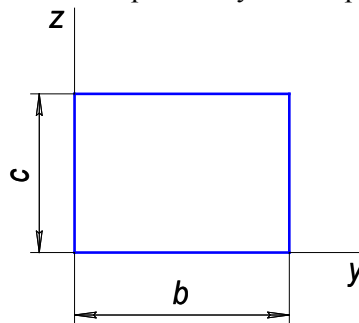


Рис. 2. Схема для визначення швидкості руху повітря в каналі прямокутного перерізу

Праву частину рівняння (6) розкладемо в ряд Фур'є:

$$-k = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin \frac{\pi n y}{b}, \quad (8)$$

де

$$C_n = \frac{2k}{b} \int_0^b (-k) \sin\left(\frac{\pi ny}{b}\right) dy = \frac{2k}{b} \frac{b}{\pi n} \cos\frac{\pi ny}{b} \Big|_0^b =$$

$$= \frac{2k}{\pi n} (1 - \cos(\pi n)) = \begin{cases} -\frac{4k}{\pi n} \dots n - \text{непарне} \\ 0 \dots n - \text{парне.} \end{cases}$$

Підставимо вирази (7) і (8) в рівняння (6):

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{d^2 f_n}{dz^2} - \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2 f_n \right) \sin\frac{\pi ny}{b} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin\frac{\pi ny}{b}.$$

Ряди Фур'є збігаються, якщо коефіцієнти однакові, тобто

$$\frac{d^2 f_n}{dz^2} - \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2 f_n = C_n. \tag{9}$$

Розв'язок цього диференціального рівняння має такий вигляд:

$$f_n(z) = A_1 \operatorname{ch}\left(\frac{\pi nz}{b}\right) + A_2 \operatorname{sh}\left(\frac{\pi nz}{b}\right) + \frac{C_n b^2}{(\pi n)^2}. \tag{10}$$

Сталі інтегрування A_1 і A_2 знаходимо з граничних умов: при $z = 0$ $\vartheta = 0$; при $z = c$ $\vartheta = 0$.

Підставляючи ці значення у формулу (10), одержимо систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} A_1 \cdot 1 + A_2 \cdot 0 - \frac{C_n b^2}{(\pi n)^2} = 0, \\ A_1 \operatorname{ch}\left(\frac{\pi nc}{b}\right) + A_2 \operatorname{sh}\left(\frac{\pi nc}{b}\right) + \frac{C_n b^2}{(\pi n)^2} = 0. \end{cases} \tag{11}$$

Звідси знаходимо

$$A_1 = \frac{C_n b^2}{(\pi n)^2}, \quad A_2 = \frac{C_n b^2}{(\pi n)^2} \frac{1 - \operatorname{ch}\left(\frac{\pi nc}{b}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{\pi nc}{b}\right)}. \tag{12}$$

Враховуючи значення C_n , одержимо остаточну формулу для знаходження швидкості ϑ у різних точках поперечного перерізу каналу:

$$\vartheta = \frac{4kb^2}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{\pi(2n-1)y}{b}\right)}{(2n-1)^3} \times$$

$$\times \left(\operatorname{ch}\left(\frac{\pi(2n-1)z}{b}\right) - 1 + \frac{1 - \operatorname{ch}\left(\frac{\pi(2n-1)c}{b}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{\pi(2n-1)c}{b}\right)} \sin\left(\frac{\pi(2n-1)z}{b}\right) \right). \tag{13}$$

Обчислимо пропускну здатність каналу:

$$Q = -\frac{8kb^4 \rho}{\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4} \left(-\frac{c}{b} + \frac{1}{\pi(2n-1)} \operatorname{sh}\left(\frac{\pi(2n-1)c}{b}\right) - \right.$$

$$\left. \left. \left. \left(1 - \operatorname{ch} \left(\frac{\pi(2n-1)c}{b} \right) \right)^2 \right) \right) \right) \operatorname{sh} \left(\frac{\pi(2n-1)c}{b} \right) \right) \right) \quad (14)$$

Якщо площа каналу постійна $A=bc=a^2$, то сторони прямокутника $b = \frac{a}{\sqrt{m}}$, $c = \sqrt{ma}$, де $m = \frac{c}{b}$ і $0 < m < \infty$, тоді формула (14) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} Q &= -k\rho a^4 \frac{8}{m^2 \pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4} \left(-m + \frac{2(\operatorname{ch}(\pi(2n-1)m) - 1)}{\pi(2n-1)\operatorname{sh}(\pi(2n-1)m)} \right) = \\ &= k\rho a^4 \frac{8}{m^2 \pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4} \left(m - \frac{2}{\pi(2n-1)} \operatorname{th} \left(\frac{\pi(2n-1)m}{2} \right) \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Як бачимо з виведених залежностей, у формули входить добуток $ka^4\rho$. Для каналу з прямокутним перерізом цей числовий коефіцієнт буде мати значення, яке можна визначити з графіка (рис. 3), що залежить від співвідношення сторін прямокутника $m = c/b$. Визначення пропускної здатності прямокутного каналу з різним співвідношенням сторін є важливим науково-практичним завданням, оскільки геометричні параметри перерізу безпосередньо впливають на гідравлічні характеристики потоку, зокрема розподіл швидкостей, втрати енергії та умови переходу між режимами течії.

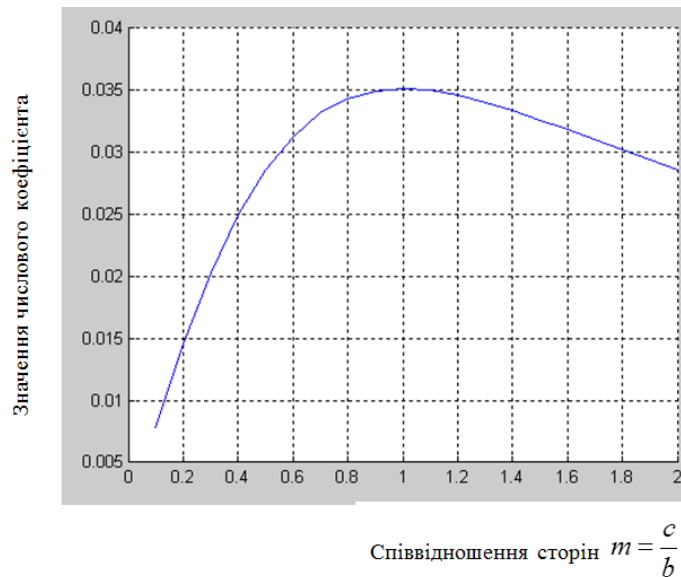


Рис. 3. Графік залежності числового коефіцієнта $ka^4\rho$ від співвідношення сторін з використанням середовища **MATLAB**

Програму визначення числового коефіцієнта розроблено в середовищі MATLAB. Визначення відношення співвідношення сторін прямокутника до числового коефіцієнта, що йому відповідає, наведено на рисунку 3.

З графіка рис. 3 бачимо, що найбільше значення коефіцієнта 0,0351 відповідає відношенню сторін $m=1$, тобто частковому випадку для перерізу у формі квадрата.

Метод імітаційного моделювання гідрогазодинамічних процесів у середовищі *SOLIDWORKS Flow Simulation* [9, 12, 13] включає кілька етапів. На першому етапі в *CAD*-модулі *SOLIDWORKS* створено тривимірну геометричну модель каналу з визначеним поперечним перерізом.

Для проведення імітаційного моделювання гідрогазодинамічного процесу в каналі використано модуль *SOLIDWORKS Flow Simulation*. Область дослідження обмежено об'ємом каналу, а граничними умовами встановлено значення тиску на вході (1,5 атм.) та на виході каналу (1 атм.). В якості середовища задано воду за температури 20°C, ціль дослідження – середнє значення швидкості руху води в каналі. Тверdotілу модель перетворено у сітку скінченних елементів з розміром елементів, який забезпечуватиме необхідну точність результатів. Після проведення моделювання проаналізовано отримані результати, побудовано епюри розподілу швидкості в заданих площинах каналу (рис. 4).

Наступним етапом моделювання було створення параметричного дослідження, яке полягало у визначенні швидкості руху рідини в каналі прямокутного перерізу за умови зміни вхідного параметра – коефіцієнта m за умови $m \in [0,1;2]$. Одержано результати параметричного моделювання, які представлено на рис. 5.

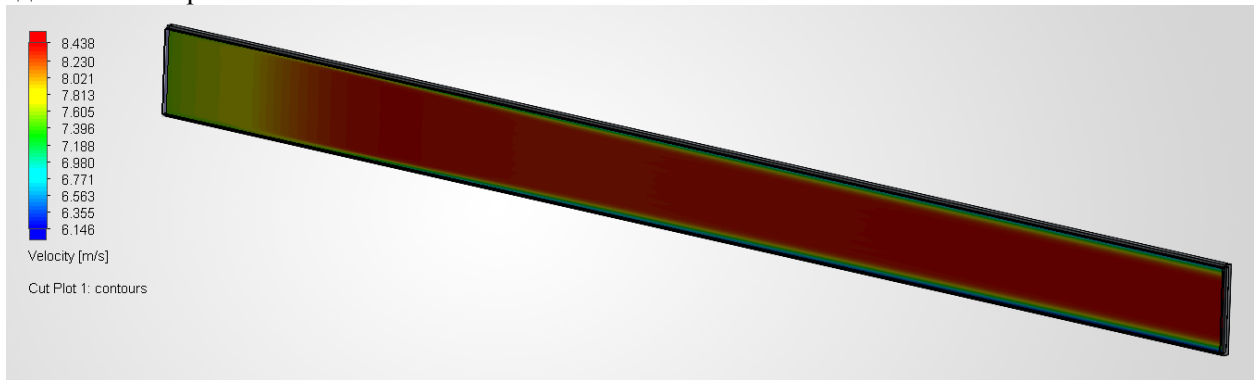


Рис. 4. Епюра розподілу швидкості руху рідини в каналі прямокутного перерізу

Summary	Design Point 1	Design Point 2	Design Point 3	Design Point 4	Design Point 5	Design Point 6	Design Point 7	Design Point 8	Design Point 9	Design Point 10
D2@Sketch1@Канал прямокутний 2.Part [mm]	3.16	4.38	5.6	6.82	8.04	9.26	10.48	11.7	12.92	14.14
GG Average Velocity 1 [m/s]	7.42609771	8.76702379	9.69606651	10.298081	10.6559913	10.776227	10.7998499	10.7347829	10.5964209	10.3894216
Status	Finished	Finished	Finished	Finished	Finished	Finished	Finished	Finished	Finished	Finished
Run at	This computer	This computer	This computer	This computer	This computer	This computer	This computer	This computer	This computer	This computer
Number of cores	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Recalculate	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Take previous results	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Save full results	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 5. Вікно сценарію та результатів параметричного моделювання процесу перетікання рідини в каналі прямокутного перерізу

За одержаними результатами системою сформовано відповідні графіки залежностей заданих цілей дослідження від вхідних параметрів (рис. 6).

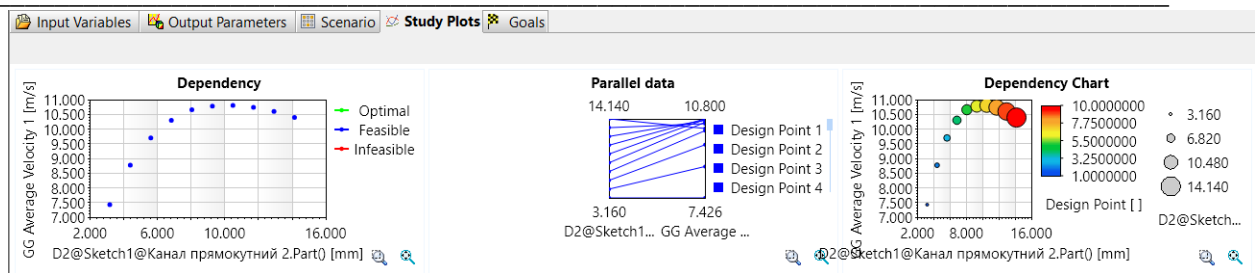


Рис. 6. Графіки залежностей цілей дослідження від значень вхідних параметрів

В процесі аналізу та інтерпретації результатів моделювання побудовано графік залежності швидкості руху рідини в каналі прямокутного перерізу від значень коефіцієнта m (рис. 7).

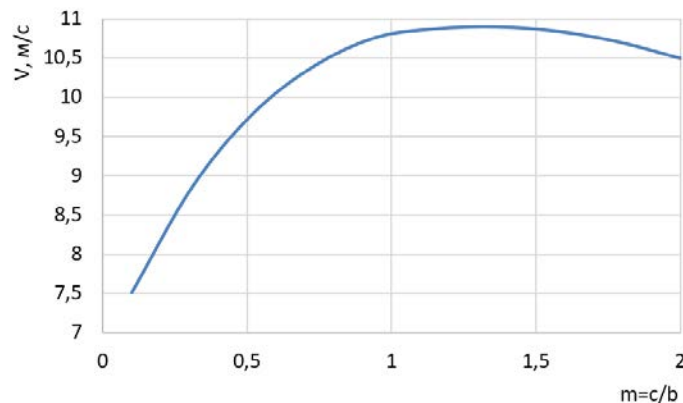


Рис. 7. Графік залежності швидкості руху рідини в каналі від коефіцієнта співвідношення сторін з використанням модуля *Flow Simulation* системи *SOLIDWORKS*

Як видно, описані вище методи демонструють практично однакові результати у відтворенні гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах з прямокутним перерізом. Зазначені залежності отримано із застосуванням принципово різних підходів: перша – шляхом чисельно-аналітичного моделювання у середовищі *MATLAB*, друга – за допомогою тривимірного інженерного моделювання та чисельної симуляції у *SOLIDWORKS*.

Аналітична модель, реалізована в *MATLAB*, базується на узагальнених рівняннях, що описують процеси у каналі, та передбачає низку припущень щодо ідеалізованого характеру течії, рівномірності розподілу параметрів по перерізу та відсутності локальних збурень. Такий підхід дозволяє отримати функціональну залежність коефіцієнта, яка відображає загальну тенденцію зміни параметра, проте не враховує впливу складних просторових ефектів.

Натомість модель, побудована у *SOLIDWORKS*, передбачає детальну геометричну репрезентацію закритого каналу з прямокутним перерізом, із урахуванням реальних граничних умов, неоднорідності полів швидкостей та можливих локальних ефектів, що виникають унаслідок взаємодії потоку зі стінками каналу. У межах цього підходу здійснюється дискретизація області та чисельне розв'язання відповідних рівнянь, що дозволяє отримати більш локалізовану та фізично деталізовану картину процесу.

Порівняння отриманих графіків показало, що при загальній подібності характеру зміни залежностей спостерігається відхилення значень коефіцієнта $ka^4\rho$, яке сягає приблизно 0,3 одиниці при повному діапазоні шкали співвідношення сторін $m = c/b$. у досліджуваних межах в 2 одиниці. Така різниця відповідає відносному розходженню на рівні близько 12%.

Виявлена невідповідність може бути зумовлена комплексом факторів, серед яких: ідеалізація фізичної моделі в аналітичному підході; різниця у постановці та реалізації граничних умов; вплив геометричних особливостей прямокутного каналу, що більш повно враховуються у тривимірному моделюванні; чисельні похибки, пов'язані з дискретизацією розрахункової області та алгоритмами розв'язання; можливі відмінності у врахуванні турбулентних або перехідних режимів течії.

Обидва підходи демонструють узгодженість у якісному описі процесу та відтворюють аналогічні тенденції зміни досліджуваного коефіцієнта $ka^4\rho$.

Висновки.

Отримано залежності, які описують вплив геометричних параметрів каналу прямокутного перерізу на особливості перебігу гідрогазодинамічних процесів у ньому. Під час аналізу враховано можливість використання різних співвідношень сторін прямокутного перерізу каналу, що дає змогу досліджувати зміну параметрів потоку за різних геометричних конфігурацій. Це, у свою чергу, підвищує точність визначення основних характеристик руху рідин і газів у закритих каналах.

Отримані результати свідчать про те, що застосування різних підходів до моделювання процесів у закритому каналі з прямокутним перерізом забезпечує загалом узгоджений якісний опис досліджуваного явища. Обидві моделі – аналітична, реалізована у MATLAB, та чисельна, побудована в SOLIDWORKS – демонструють подібний характер зміни коефіцієнта $ka^4\rho$, що підтверджує коректність обраного підходу до дослідження.

Водночас виявлене відхилення у значеннях коефіцієнта $ka^4\rho$ на рівні близько 0,3 для шкали співвідношення сторін у досліджуваних межах в 2 одиниці може бути пояснене особливостями реалізації моделей, різницею у врахуванні фізичних факторів та ступенем їх деталізації. Така розбіжність не є критичною, однак вказує на доцільність подальшого уточнення моделей з метою підвищення їх узгодженості.

Отже, отримані результати відображають основні закономірності процесу для попереднього аналізу, а подальші дослідження доцільно спрямувати на деталізацію моделей, уточнення вихідних припущень і експериментальну перевірку для підвищення точності та надійності одержаних залежностей. Отримані результати створюють підґрунтя для обґрунтованого вибору геометрії каналів у технологічних системах.

Список використаних джерел

1. Баранович С.М. Обґрунтування параметрів пульсатора доільного апарата з регульованою тривалістю такту ссання: дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2015. 165 с.
2. Баранович С., Стукалець І., Шеремета Р., Коробка С., Бабич М.. Методики дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах різного перерізу. Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження, (27), 108–112. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.108>.
3. Баранович С.М., Стукалець І.Г., Коробка С.В., Бабич М.І., Толстушко М.М., Толстушко Н.О. Дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах круглого та трикутного перерізу. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник наук. праць. 2025. Вип. 83. С. 177 – 182. / URL: https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky.
4. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу [Підручник] / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – К.: Вища школа, 2002. – 277 с.
5. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: Підручник.-Київ: Фірма «Інкос», Центр навчальної літератури, 2006. — 616с.
6. Колчунов В. І. Теоретична та прикладна гідромеханіка: Навч. Посібник. — К.:НАУ, 2004. – 336с.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 томах. Том VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.
8. Лазарев Ю. Ф. Початки програмування у середовищі MATLAB: Навч. посібник. – К.: "Корнійчук", 1999. – 160 с.
9. Свирень Н. О. Приложение законов гидродинамики к особенностям пневматических высевающих аппаратов / Н. О. Свирень, Н. Н. Петренко // Збірник наукових праць Кіровоградського інституту сільськогосподарського машинобудування : Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 1998. – № 2. – С. 177-180.
10. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів. Курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів : ЛНУП, 2022. – 109 с.
11. Цяпко М. Ф., Мамаєв Л. М. Гідрогазодинаміка – К.: ІСДМО, 1995 – 211 с.

12. Цяпко М. Ф., Яловий М. І., Павленко А. М. Гідрогазодинаміка – Дніпродзержинськ; ДДТУ, 2009. – 264 с.

13. An Introduction to Flow Analysis Applications with SolidWorks Flow Simulation, Student Guide: Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2013. – 19 p.

14. SolidWorks, “SOLIDWORKS Flow Simulation,” Dassault Systemes. URL: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm>. (дата звернення: 16.03.2026).

Рецензент Шимчук Сергій Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету.

Дата надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

О.С. Чапюк^[0000-0003-0283-1863], О.М. Кратюк^[0009-0007-8265-9544]

Луцький національний технічний університет

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМІВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНОЇ КЛЕСНОЇ ДЕРЕВИНИ ЗА РІЗНОЇ ВОЛОГОСТІ В ДОКРИТИЧНІЙ ТА ЗАКРИТИЧНІЙ СТАДІЯХ РОБОТИ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА СТАДІЯ

Проведено експериментальні дослідження конструкційної клеєної деревини сосни та ялини різної вологості після занурення у річковому та морському водних середовищах осьовим стиском вздовж волокон за жорсткого режиму випробувань. Експериментальним шляхом встановлено основні механічні характеристики клеєної деревини сосни та ялини в докритичній та закритичній стадіях роботи, в тому числі тимчасову граничну міцність деревини, модуль пружності, відносні критичні, граничні та залишкові деформації, за таких умов експлуатації. Запропоновано формули для визначення відносних граничних деформацій конструкційної клеєної деревини за різної вологості. Встановлено основні деформівні характеристики клеєної деревини сосни та ялини, як у річковому водному середовищі, так і морському, відносні критичні, граничні та залишкові деформації. За вологості 21% та 30% збільшуються в порівнянні з характеристиками, визначеними за стандартної вологості 12%.

Ключові слова: клеєна деревина, напружено-деформований стан, міцність, деформівність, стиск, навантаження.

O.S. Chapiuk, O.M. Kratiuk

TO DETERMINATION OF DEFORMATION CHARACTERISTICS OF GLUE-LAILED PINE AND SPRUCE WOOD AT DIFFERENT HUMIDITIES IN THE PRECRITICAL AND POSTCRITICAL STAGES OF WORK: EXPERIMENTAL STAGE

Solid and glued wood is often operated in environments with different humidity levels. Current regulatory documents limit such operation to the K_{mod} coefficient. In some cases, it is unclear how to determine certain mechanical characteristics with increased moisture content, including deformable ones. For example, the operation of elements in bridge structures, hydraulic structures, sea piers, shore protection structures, and others. Very often, materials, elements, and structures based on wood operate in a post-critical stage of operation (seismic vibrations, dynamic loads, progressive destruction, floods, changes in water levels, and others).

The purpose of our research is to conduct experimental studies of structural glued laminated wood of pine and spruce with different moisture content under a strict regime of axial compression tests along the fibers during operation in river and marine aquatic environments. As well as to establish the main deformation parameters in the pre-critical and post-critical stages of operation under such operating conditions.

Experimental studies of structural glued pine and spruce wood of different humidity after immersion in river and sea water environments by axial compression along the fibers under a rigid test regime were carried out. The main mechanical characteristics of glued pine and spruce wood in the pre-critical and post-critical stages of operation were experimentally established, including the temporary ultimate strength of wood, the modulus of elasticity, relative critical, limiting and residual deformations, under such operating conditions. Formulas were proposed for determining the relative limiting deformations of structural glued wood at different humidity. The main deformation characteristics of glued pine and spruce wood, both in river and sea water environments, relative critical, limiting and residual deformations were established. At humidity levels of 21% and 30%, they increase in comparison with the characteristics determined at a standard humidity of 12%.

Key words: modified wood, stress-strain state, strength, load-bearing capacity, deformation, compression, bending, tension.

Постановка проблеми. Деревина вже сотні років залишається одним з найпопулярніших матеріалів в різних сферах життя [1-6]. Вона має своєрідні неповторні фізико-механічні властивості. В залежності від породи деревини, її твердості та інших властивостей залежить її безпосереднє призначення. В більшості випадків при зведенні будівель та споруд різного призначення в якості несучих дерев'яних елементів та конструкцій використовують хвойні породи: сосна, ялина, модрина, смерека, ялиця, тис та інші. Хоча звичайно є і винятки. Дуже часто використовують цільну або клеєну деревину. Клеєна має певні переваги над цільною і може застосовуватися для перекриття більших прольотів [7,8].

Звичайно деревина, як інші матеріали, має свої переваги та недоліки. Основними перевагами є відносно невелика вага, достатня міцність та модуль пружності, легко з'єднується між собою та з іншими матеріалами [1-9]. Часто може експлуатуватися в агресивних середовищах, в тому числі і водних (прісних і солоних) [10-17].

Аналіз останніх досліджень. Цільна та клеєна досить часто експлуатується в середовищах з різним показником вологості [10-17]. Діючі нормативні документи обмежують таку експлуатацію

© О.С. Чапюк, О.М. Кратюк

коефіцієнтом K_{mod} [18,19,29]. В окремих випадках незрозуміло як саме необхідно визначати певні механічні характеристики з підвищеним вмістом вологи, в тому числі і деформівних. Наприклад, робота елементів у складі мостових конструкцій, гідротехнічних споруд, морських пірсів, берегоукріплюючих споруд та інших. Дуже часто матеріали, елементи та конструкції на основі деревини працюють в закритичній стадії роботи (сейсмічні коливання, динамічні навантаження, прогресуюче руйнування, паводки, зміна рівня води та інші).

Експериментальні дослідження та запропоновані методики з визначення основних механічних характеристик в закритичній стадії роботи з різним показником вологості за осьового стиску вздовж волокон, в тому числі деформівних, що стосуються цільної деревини знаходимо в роботах Гомона Св.Св. [20-23] та його учнів – Верешка О.В. [24], Матвіюка О.В. [25,26], Рощука М.М. [27]. Автори досить достеменно вивчили поведінку роботи цільної деревини листяних та хвойних порід за таких умов експлуатації, побудували повні діаграми деформування за жорсткого режиму, експериментальним та теоретичним шляхом встановили основні механічні показники: тимчасову граничну міцність, відносні критичні, граничні та залишкові деформації, модуль пружності та січний модуль деформацій.

Експериментальні дослідження конструкційної клеєної деревини стандартної вологості 12% за жорсткого режиму навантажень осьовим стиском вздовж волокон знаходимо тільки в наукових працях Гомона Св.Св. [28].

В світовій практиці фактично відсутні експериментальні та теоретичні дослідження, що стосуються змінного впливу вологості на механічні характеристики конструкційної клеєної деревини сосни та ялини в докритичній та закритичній стадії роботи матеріалу на стиск вздовж волокон. А як наслідок відсутні повні діаграми деформування за таких умов експлуатації, а також основні показники міцності та деформівності: тимчасова гранична міцність, відносні критичні, граничні та залишкові деформації, модуль пружності та січний модуль деформацій.

Постановка завдання. Метою наших досліджень є проведення експериментальних досліджень конструкційної клеєної деревини сосни та ялини з різним показником вологості за жорсткого режиму випробувань осьовим стиском вздовж волокон за експлуатації у річкових та морських водних середовищах. А також встановлення основних деформівних показників в докритичній та закритичній стадіях роботи за таких умов експлуатації.

Методи експериментальних досліджень. Для реалізації поставлених завдань було виготовлено призматичні зразки (30×30×120 мм) із конструкційної клеєної деревини першого сорту сосни та ялини.

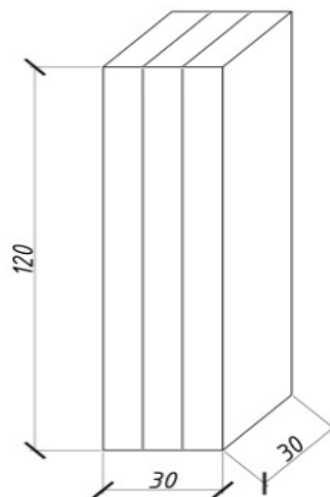


Рис.1. Розміри призматичних дослідних зразків

Вихідну сировину відбирали за критеріями прямолінійності стовбура та низької сучкуватості відповідно до [30-35], що дозволило забезпечити однорідність структури та орієнтацію волокон. Після заготівлі деревину транспортували на виробництво, де її розпилювали на бруси, маркували та висушували до нормативної вологості. Надалі бруси розкроювали на дошки розміром 10×40 мм і довжиною 100 см. Склеювання по пласту виконували із застосуванням резорцинового клею у

заводських умовах. Пресування тривало 12 годин із подальшою витримкою 48 годин до повного твердіння. Умови склеювання: температура 20 °С, відносна вологість 65±5 %. Зразки для випробувань вирізали з однієї балки окремо для кожної породи деревини.

Під час випробувань використовували конструкційну клеєну деревину з вологістю 12%, 21% та 30%. Призматичні зразки деревини стандартної вологості 12 % занурювали відповідно у річкове та морське водні середовища в лабораторних умовах до усередненої вологості 21 ± 1 % та 30 ± 1 %. Річкова вода бралася з річки Стир (м. Луцьк), а морська – з Чорного моря (м. Одеса).

Обсяг експериментальних досліджень конструкційної клеєної деревини різної вологості наведено в табл. 1.

Табл. 1

Обсяг експериментальних досліджень конструкційної клеєної деревини різної вологості

№	Порода деревини	Переріз зразків, мм	Вологість, %	Вік деревини, років	Тип клею	Кількість зразків, шт.
Річкове водне середовище						
1	Сосна	30x30x120	12, 21, 30	50-75	резорциновий	15
2	Ялина	30x30x120	12, 21, 30	50-75	резорциновий	15
Морське водне середовище						
3	Сосна	30x30x120	12, 21, 30	50-75	резорциновий	15
4	Ялина	30x30x120	12, 21, 30	50-75	резорциновий	15

Загальна кількість зразків клеєної деревини всіх досліджуваних порід, що підлягали випробуванню, становила 54 одиниці. Експериментальні дослідження в умовах жорсткого режиму навантаження проводили на випробувальній машині СТМ-100 [28,35] зі швидкістю деформування 1,5 мм/хв.

Результати проведених експериментів. На підставі виконаних експериментальних досліджень були встановлені основні механічні характеристики конструкційної клеєної деревини за вологості 12%, 21%, 30%, що експлуатувалися в річковому та морському водних середовищах, за осового стиску вздовж волокон в докритичній та закритичній стадіях роботи (табл. 1).

Табл. 1

До визначення деформівних характеристик конструкційної клеєної деревини за різної вологості в докритичній та закритичній стадіях роботи

W, %	$f_{c,0,d}$, МПа	E, МПа	u_{c1} , мм/мм	$u_{c,0,d}$, мм/мм	$u_{c,u}$, мм/мм	$u_{c,fin}$, мм/мм
Річкове водне середовище						
Сосна						
12	49,8	13900	0,00067	0,00506	0,00698	0,3401
21	34,6	11200	0,00071	0,00557	0,00791	0,3775
30	22,8	10100	0,00078	0,00621	0,00838	0,4217
Ялина						
12	46,1	15300	0,00060	0,00457	0,00640	0,3119
21	31,7	12700	0,00063	0,00530	0,00726	0,3369
30	21,3	11600	0,00069	0,00571	0,00822	0,3712
Морське водне середовище						
Сосна						
12	49,8	13900	0,00067	0,00506	0,00698	0,3401
21	32,7	11000	0,00071	0,00570	0,00827	0,3819
30	22,0	9900	0,00079	0,00635	0,00940	0,4353
Ялина						
12	46,1	15300	0,00060	0,00457	0,00640	0,3119
21	29,9	12600	0,00065	0,00536	0,00766	0,3457
30	20,8	11200	0,00072	0,00579	0,00805	0,3872

Згідно табл.1 було встановлено, що основні механічні показники конструкційної клеєної деревини з підвищенням вологості погіршуються, як у річковому водному середовищі, так і морському. Зокрема, деформівні характеристики клеєної деревини сосни та ялини за вологості 21% та 30% збільшуються в порівнянні з характеристиками, визначеними за стандартної вологості 12%.

Отже, в річковому водному середовищі відносні критичні деформації деревини сосни за вологості 30% зросли в 1,23 рази, а деревини ялини – в 1,25 рази; відносні граничні деформації для деревини сосни збільшились в 1,20 рази, а для деревини ялини – в 1,28 рази; відносні залишкові деформації для деревини сосни зросли в 1,24 рази, а для деревини ялини – в 1,19 рази.

Таким чином, в морському водному середовищі відносні критичні деформації деревини сосни за вологості 30% зросли в 1,25 рази, а деревини ялини – в 1,26 рази; відносні граничні деформації для деревини сосни збільшились в 1,35 рази, а для деревини ялини – в 1,26 рази; відносні залишкові деформації для деревини сосни зросли в 1,28 рази, а для деревини ялини – в 1,24 рази.

За методикою запропованою Гомоном Св.Св. в науковій праці [30] наведемо формули для визначення відносних граничних деформацій конструкційної клеєної деревини різної вологості в залежності від критичних.

Зокрема, для річкового водного середовища:

- для деревини сосни 12 % запропоновано в роботі [30]

$$u_{c,u} = 1,38 \cdot u_{c,0,d}; \quad (1)$$

- для деревини сосни 21 %

$$u_{c,u} = 1,42 \cdot u_{c,0,d}; \quad (2)$$

- для деревини сосни 30 %

$$u_{c,u} = 1,35 \cdot u_{c,0,d}; \quad (3)$$

- для деревини ялини 12 % запропоновано в роботі [30]

$$u_{c,u} = 1,40 \cdot u_{c,0,d}; \quad (4)$$

- для деревини ялини 21 %

$$u_{c,u} = 1,37 \cdot u_{c,0,d}; \quad (5)$$

- для деревини ялини 30 %

$$u_{c,u} = 1,44 \cdot u_{c,0,d}. \quad (6)$$

Зокрема, для морського водного середовища:

- для деревини сосни 21 %

$$u_{c,u} = 1,45 \cdot u_{c,0,d}; \quad (7)$$

- для деревини сосни 30 %

$$u_{c,u} = 1,48 \cdot u_{c,0,d}; \quad (8)$$

- для деревини ялини 21 %

$$u_{c,u} = 1,43 \cdot u_{c,0,d}; \quad (9)$$

-

- для деревини ялини 30 %

$$u_{c,u} = 1,39 \cdot u_{c,0,d}. \quad (10)$$

Висновки

1. Вперше проведено експериментальні дослідження конструкційної клеєної деревини сосни та ялини різної вологості після занурення у річковому та морському водних середовищах осьовим стиском вздовж волокон за жорсткого режиму випробувань.
2. Експериментальним шляхом встановлено основні механічні характеристики клеєної деревини сосни та ялини в докритичній та закритичній стадіях роботи, в тому числі тимчасову граничну міцність деревини, модуль пружності, відносні критичні, граничні та залишкові деформації, за таких умов експлуатації.
3. Запропоновано формули для визначення відносних граничних деформацій конструкційної клеєної деревини за різної вологості.

4. Встановлено основні деформівні характеристики клеєної деревини сосни та ялини, як у річковому водному середовищі, так і морському, відносні критичні, граничні та залишкові деформації. За вологості 21% та 30% збільшуються в порівнянні з характеристиками, визначеними за стандартної вологості 12%.

Список використаних джерел

1. Вінтонів І.С., Сопушинський І.М., Тайшінгер А. Деревинознавство: навчальний посібник. Львів: Априорі, 2007. 312 с.
2. Гомон О.О., Чапюк О.С., Савчук С.М. Використання клеєної деревини у промисловості. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, 2024. Вип. 22, С. 15–22. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-04)
3. Довбенко Т.О., Петренко О.В., Чапюк О.С., Гомон О.О. Аналіз способів модифікування деревини. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. Рівне, 2024. Вип. 4(108). С. 12-20.
4. Гомон О.О. Моделювання роботи дерев'яних балок модифікованих епоксидною смолою після впливу одноразових та малоциклових навантажень методом скінченних елементів. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2025. Vol 4 (4). P. 56–68. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250404.05>
5. Kysliuk D.Y., Homon O., Chapiuk O., Talakh L., Skrypnyk M., Polishchuk-Herasymchuk T., Sokil P., Kulakovskiy L., 2026. Mechanical characteristics of epoxy-modified wood: an experimental study. *Procedia Structural Integrity* 81, 430-433. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2026.03.074>
6. Матвіюк О.В. Покращення механічних властивостей конструкційної деревини за експлуатації в агресивних середовищах: дис. ...к.т.н. 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 165 с.
7. Цапко Ю.В., Ліхнівський Р.В. Дослідження структури модифікованої деревини. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. Київ, 2013. Вип. 49. С. 170–174.
8. Горбачова О.Ю., Пінчевська О.О. Термічне модифікування деревини граба: монографія. Київ, 2017.
9. Довбенко Т.О., Гомон Св.Св., Матвіюк О.В., Павлюк А.П. Модифікація деревини екологічно чистими матеріалами. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки»*. Рівне: НУВГП, 2023. Випуск 1 (101). С. 134-142.
10. Бехта П.А., Салабай Р.Г. Класифікація деревинних композиційних матеріалів. *Наукові праці лісівничої академії наук України*. Львів: НЛТУ, 2002. Вип. 1. С. 114-117.
11. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ: Укрархбудінформ, 2017. 111 с.
12. Eurocode 5. (2004). Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings. 124 p.
13. ДСТУ EN 384:2022. Конструкційний лісоматеріал. Визначення характеристичних значень механічних властивостей та щільності. К.: Мінрегіон України, 2023.

Дата надходження статті до видання: 11.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ

Стаття надсилається до редакції збірника у паперовому варіанті з підписами авторів на адресу: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська 75, Луцький НТУ; в електронному вигляді у форматі MS WORD– на електронну адресу: naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua. Обидва варіанти повинні бути ідентичними.

Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті; виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.

1. **Статтю можна подавати українською або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03 і надрукована тільки на лазерному або струйному принтері на білих листах формату А4 (297x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 4-9 сторінок.
2. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та ліве поле – 2 см, праве поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
3. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Суг розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по центру. Назва статті розміщується на один абзац нижче назви організації, набирається шрифтом Time New Roman Суг розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
4. **Анотації** українською та англійською мовами набираються з абзацного відступу шрифтом Time New Roman Суг розміром 9, курсив, напівжирний 300-500 друкованих знаків з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині; англійською мовами розширена анотація 700-1000 друкованих знаків.
5. Нижче анотацій обов'язково вказуються ключові слова шрифтом Time New Roman Суг, курсив, напівжирний 9 пт.
6. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Суг розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.
7. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Суг; розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
8. Якщо в статті присутні ілюстрації, необхідно розташовувати їх по тексту, вирівнюючи підписи (*Рис. 1. Схема ...*) по ширині з абзацного відступу 1 см. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.

9. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (*Табл. 1*) вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці вирівнюючи по центру.
10. Література подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.
11. **Обов'язково** подати статтю. на лазерному диску. Статті можна також пересилати електронною поштою за такою адресою: **naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua**
12. До статті **обов'язково** додається **рецензія від** провідного вченого за науковим спрямуванням статті та **авторська довідка** у письмовому та електронному вигляді за вказаною формою:

Прізвище, Ім'я, По-батькові

Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання

Наукові інтереси, ORCID

Назва статті та особисті підписи усіх авторів

Адреса для листування, телефон, e-mail, контактну особу

14. В кінці статті обов'язково вказуються ПІБ, посаду, науковий ступінь, вчене звання рецензента статті.
15. Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.
16. У прийнятих до опублікування рукописах вказується ISSN-номер видання, ORCID автора (авторів) та дати першого надходження статті до видання, прийняття статті до друку після рецензування та її публікації (оприлюднення).

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

УДК: 620.179.16

I.I. Васильченко¹[ORCID], С.С. Сидоренко²[ORCID]
Луцький національний технічний університет¹
Тернопільський національний технічний університет²

НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОЇДА, ПРЕДСТАВЛЕНОГО ДИСКРЕТНИМ КАРКАСОМ ТВІРНИХ

Розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом спільних твірних.

Ключові слова: вісь коноїда, дискретний каркас, твірна.

I.I. Vasylychenko¹[ORCID], S.S. Sydorenko²[ORCID] **AXIS APPROXIMATE DEFINITION OF CONOID DESCRIBED BY THE SET OF STRAIGHT LINES**

The algorithm of axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines is made. The approximate conoid axis is a line. Conoid is created by straight lines.

Keywords: conoid axis, discretely carcass of straight lines.

Постановка проблеми. На коноїді, представленому дискретним каркасом.....

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наскільки відомо автору з.....

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – розробити алгоритм.....

Викладення основного матеріалу. Для наближеного визначення осі використовувалася така властивість коноїдів: усі твірні поверхні перетинають її вісь [1].

формула (1)

Рисунок

Рис. 1. Назва рисунка

Назва таблиці

Табл. 1.

Висновки. В статті розроблено алгоритм наближеного....

Список використаних джерел:

ШБ, посада, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.

Ціна договірна

Видання відповідає кластеру «Механічна інженерія та машинобудування».

Комп'ютерний набір та верстка: О.Д. Клименко

Наклад 300 прим.

Веб-сайт збірника:

<http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi-notatky>

Довідки за e-mail: naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 10 від 26 березня 2026 р.

ISSN: 2415-3966

43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

© Луцький національний технічний університет, 2026 р.

